

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA CEN- TRADO EN EL ÁMBITO DE LA AUTOMOCIÓN



Grado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Trabajo Fin de Grado

Autor: Alejandro Echandi Mínguez

Tutor: Francisco Falcone Lanas

Pamplona, 11 de junio de 2021



## TABLA DE CONTENIDO

---

1	Introducción y objetivos.....	8
2	EMI Y EMC .....	8
2.1	Importancia de la EMC .....	9
3	Ensayos de EMC .....	11
3.1	Armónicos .....	12
3.1.1	Clase A .....	12
3.1.2	Clase B.....	12
3.1.3	Clase C.....	12
3.1.4	Clase D .....	13
3.2	Flicker (Parpadeo).....	14
3.3	Emisión Conducida .....	15
3.3.1	ETI de clase B.....	15
3.3.2	ETI de Clase A.....	15
3.4	Emisión Conducida Telecom .....	17
3.4.1	ETI de clase B.....	17
3.4.2	ETI de Clase A.....	17
3.5	Emisión radiada.....	19
3.5.1	ETI de clase B.....	19
3.5.2	ETI de Clase A.....	19
3.5.3	Set up .....	19
3.5.4	Rango 30MHz-1GHz:.....	20
3.5.5	Rango 1GHz-6GHz: .....	21
3.6	ESD .....	22
A.	Aplicación directa: .....	22
B.	Aplicación indirecta: .....	22
3.7	Inmunidad radiada.....	24
	Rango de frecuencias de 80 MHz a 1 GHz:.....	24
I.	Rango de frecuencias de 1 GHz a 6 GHz: .....	24
3.8	Ráfagas .....	26
3.9	Surges (Ondas de choque).....	28
3.10	Inyección en RF .....	30
3.11	Campo magnético.....	31
3.12	Campo magnético impulsional.....	32
3.13	Huecos e interrupciones .....	33
4	CISPR 25 .....	34
4.1	Introducción a CISPR 25.....	34

4.2	Limitaciones en Naitec.....	35
4.3	Límites.....	40
4.4	Soluciones obtenidas.....	41
4.4.1	Cámara anecoica.....	41
4.4.2	Mesa de ensayo.....	41
4.4.3	Antenas.....	42
4.4.4	LISN.....	42
5	Proyecto elegido.....	43
5.1	Explicación del proyecto:.....	43
5.2	CAD's y esquemáticos.....	45
6	LISN.....	46
6.1	Introducción.....	46
6.2	Bobina.....	47
6.2.1	Proceso de diseño.....	47
6.2.2	Simulación.....	49
6.2.3	Construcción.....	52
6.2.4	Medida.....	53
6.3	LISN.....	57
6.3.1	Diseño.....	57
6.3.2	Construcción.....	58
6.3.3	Simulación.....	60
6.3.4	Medida.....	61
6.4	Comprobación.....	65
7	Ensayo de emisión radiada.....	66
7.1	Introducción del ensayo.....	66
7.2	Resultados obtenidos.....	66
7.2.1	Ensayo sin LISN.....	66
7.2.2	Ensayo con LISN.....	70
8	campo cercano.....	74
8.1	Introducción y explicación de aparatos de medida.....	74
8.2	Datos y gráfica 3D.....	75
9	Simulación en CST.....	77
9.1	Introducción a CST.....	77
9.2	Simulación de elementos sencillos.....	77
9.3	Simulación de proyecto.....	79
10	. Conclusiones y líneas futuras.....	80
11	Bibliografía.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS:

---

Figura 2.1. Ilustración del ensayo de Hans Christian Oersted (fuente: <a href="https://culturacientifica.com/">https://culturacientifica.com/</a> ) .....	8
Figura 2.2. Ilustración de campo eléctrico y magnético perpendicular entre sí. (fuente: <a href="https://www.imamagnets.com/">https://www.imamagnets.com/</a> ) .....	9
Figura 2.3. Gráfico tiempo-costo (fuente: <a href="https://incompliancemag.com/">https://incompliancemag.com/</a> ) .....	10
Figura. 3.1. Lista de ensayos EMC en Naitec. ....	11
Figura 3.3.1. Disposición para EUT de sobremesa o pared. (fuente: Métodos de ensayo Naitec) .....	16
Figura 3.3.2. Disposición para EUT de suelo. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	16
Figura 3.4.1 Set up del ensayo de Emisión Conducida Telecom. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	18
Figura 3.5.1. Set up dispositivo sobremesa. (fuente: Métodos de ensayo Naitec) .....	20
Figura 3.5.2 Set up dispositivo sobresuelo. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	20
Figura. 3.6.1. Ensayo ESD de EUT en mesa (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	22
Figura. 3.6.2. Ensayo ESD de EUT en suelo(fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	22
Figura. 3.6.3 Tabla de criterio de aptitud en inmunidad radiada. (fuente: UNE EN 61000-6-1:2007). ....	23
Figura. 3.7.1. Antena BiConiLog (fuente: <a href="https://www.altoo.dk/">https://www.altoo.dk/</a> ) .....	24
Figura. 3.7.2. Antena stacked log-periódica (fuente: <a href="https://www.scientificindia.com/">https://www.scientificindia.com/</a> ).....	24
Figura. 3.7.3 Carros de ferritas en la cámara (<1Ghz) .....	25
Figura. 3.7.4 Absorbentes encima de los carros(>1Ghz) .....	25
Figura. 3.7.5 Ilustración del set up del ensayo de Inmunidad Radiada (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	25
Figura. 3.8.1. Señal de las ráfagas introducidas (fuente: <a href="https://croydonservice.com/emc-immunity/1446/">https://croydonservice.com/emc-immunity/1446/</a> ).....	26
Figura. 3.8.2. CDN interna. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	27
Figura. 3.8.3. pinza en el cable de señal. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	27
Figura 3.9. Señal aplicada en el ensayo. (fuente: TESEQ). ....	28
Figura 3.9.2. Set up Surges. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	29
Figura 3.9.3 Set up Surges con equipo auxiliar. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	29
Figura 3.10. Set-up típico de ensayo de ensayo de inyección en RF (fuente: Métodos de ensayo Naitec).....	30
Figura. 3.11. Ilustración de ensayo de campo magnético. (fuente: Métodos de ensayo Naitec). 31	
Figura. 3.13. Ilustración de señal aplicada en el ensayo de Huecos e Interrupciones. (fuente: <a href="https://transientspecialists.com/">https://transientspecialists.com/</a> ) .....	33

Figura. 4.1. Interferencias en un vehículo. (fuente: “Diseño e implementación de un sistema completo de medida de antenas en campo abierto.” Autor: Víctor Mata García.).....	34
Figura. 4.2.1. Lista de ensayos EMC (referente a CISPR 25 en rojo).....	35
Figura. 4.2.2. Mesa conductora CISPR 25 (fuente: <a href="https://incompliancemag.com/">https://incompliancemag.com/</a> ).....	36
Figura. 4.2.3 Dimensiones de la mesa conductora CISPR 25 (fuente: Norma CISPR 25) .....	37
Figura. 4.2.4. Set up varilla mono polo activa. (fuente: Norma CISPR 25).....	37
Figura. 4.2.5. Antena Monopolo (fuente: <a href="https://incompliancemag.com/">https://incompliancemag.com/</a> ) .....	38
Figura. 4.2.6. Antena bicónica (fuente: <a href="https://incompliancemag.com/">https://incompliancemag.com/</a> ) .....	38
Figura. 4.2.7. Antena Log periódica (fuente: <a href="https://incompliancemag.com/">https://incompliancemag.com/</a> ).....	38
Figura. 4.2.8. Antena de bocina (fuente: <a href="https://incompliancemag.com/">https://incompliancemag.com/</a> ) .....	38
Figura. 4.3 Límites impedancia LISN (fuente: Tekbox TBOH01 Manual) .....	39
Figura. 4.3.1. Tabla de límites de banda ancha detector de pico y quasi-pico. (fuente: CISPR 25) .....	40
Figura. 4.3.2. Tabla de límites de banda estrecha detector de pico. (fuente: CISPR 25) .....	40
Figura. 4.4.2. Imagen de la conexión del plano de la mesa con el suelo de la cámara semianecoica. ....	41
Figura. 5.1.1. Diagrama de bloques de la tarjeta.(fuente: proyecto Sofía Naitec). ....	43
Figura. 5.1.2. Imagen superior de la tarjeta. ....	44
Figura. 5.1.3. Imagen con perspectiva de la tarjeta. ....	44
Figura. 5.2 CAD tarjeta Sofia (fuente: Proyecto Sofia Naitec).....	45
Figura. 6.2.1.1 Valores de diseño de la bobina. (fuente: <a href="https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1">https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1</a> ). ....	47
Figura. 6.2.1.2 Valores de inductancia, capacidad y resistencia. (fuente: <a href="https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1">https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1</a> ). ....	48
Figura. 6.2.1.3 Frecuencia de resonancia. (fuente: <a href="https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1">https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1</a> ). ....	48
Figura. 6.2.2.1 Circuito equivalente de la bobina una entrada. ....	49
Figura. 6.2.2.2 Respuesta del parámetro S11 con una entrada. ....	49
Figura. 6.2.2.3 Circuito equivalente de la bobina dos entradas.....	50
Figura. 6.2.2.4 Respuesta del parámetro S11 con dos entradas. ....	50
Figura. 6.2.2.5 Respuesta del parámetro S21 con dos entradas .....	51
Figura. 6.2.3.2. Acabado final.....	52
Figura. 6.2.3.1. Proceso de fabricación. ....	52
Figura. 6.2.4.1 Medida de la bobina A en LCR. ....	53
Figura. 6.2.4.2 Medida de la bobina B en LCR.....	53
Figura. 6.2.4.3 Medida VNA Bobina. ....	54
Figura. 6.2.4.4 Carta Smith bobina. ....	54
Figura. 6.2.4.5 Bobina con BNC soldados. ....	55
Figura. 6.2.4.6 Set up de la medida de la bobina con 2 puertos al VNA. ....	55

Figura. 6.2.4.7 Módulo y fase de s11 escala lineal .....	56
Figura. 6.2.4.8. Módulo y fase de s21 escala log .....	56
Figura. 6.2.4.9 Módulo y fase de s21 escala lineal .....	56
Figura. 6.3.1.1 Esquema eléctrico de LISN específica CISPR 25. (fuente: CISPR 25).....	57
Figura. 6.3.2.1 Lista de los componentes de la LISN. ....	58
Figura. 6.3.2.2 Imágenes del mecanizado de la caja. ....	58
Figura. 6.3.2.3. Imagen de la caja con los conectores. ....	59
Figura. 6.3.2.4. Imagen del interior de la LISN .....	59
Figura. 6.3.3.1. Circuito de simulación de la LISN.....	60
Figura. 6.3.3.2. Módulo de S11 y S22 del circuito.....	60
Figura. 6.3.4.1. Set up del ensayo con indicadores, LISN positivo.....	61
Figura. 6.3.4.2. Set up del ensayo LISN negativo.....	62
Figura. 6.3.4.3. Tabla respuesta del módulo y fase parámetros S11 y S22 VNA. ....	62
Figura. 6.3.4.4 Set up medida de impedancia de la LISN positivo. ....	63
Figura. 6.3.4.5. Graficas módulo y fase de impedancia en LISN positivo.....	63
Figura. 6.3.4.6 Set up medida de impedancia de la LISN negativo. ....	64
Figura. 6.3.4.5. Graficas módulo y fase de impedancia en LISN negativo.....	64
Figura. 6.4. Gráfico Excel de límites de impedancia de las LISN. ....	65
Figura. 7.1. Batería de ensayos emisión radiada CISPR 25 .....	66
Figura. 7.2.1. Set up ensayo sin LISN.....	66
Figura. 7.2.1.1.1 Gráfica sin LISN y motor libre. ....	67
Figura. 7.2.1.1.2 Tabla Cuasi-pico sin Lisn y motor libre .....	67
Figura. 7.2.1.2.1 Grafica sin LISN y motor con carga .....	68
Figura. 7.2.1.2.2 Tabla cuasipico sin LISN y motor con carga.....	68
Figura. 7.2.1.3.1 Gráfica sin LISN y stand by.....	69
Figura. 7.2.1.3.2. Tabla cuasi pico sin LISN y stand by. ....	69
Figura. 7.3.2 Set up ensayo con LISN.....	70
Figura. 7.2.2.1.1 Gráfica con LISN y motor libre. ....	70
Figura. 7.2.2.1.2 Tabla cuasi pico con LISN y motor libre. ....	71
Figura. 7.2.2.2.1 Gráfica con LISN y motor con carga. ....	71
Figura. 7.2.2.2.2. Tabla cuasi pico con LISN y motor con carga.....	72
Figura. 7.2.2.3.1 Gráfica con LISN y stand by. ....	72
Figura. 7.2.2.3.1 Tabla cuasi pico con LINS y stand by. ....	72
Figura. 8.1.1 Especificaciones e imagen de sondas. (fuente: Langer EMV RF2).....	74
Figura. 8.1.2 Set up Medida de campo cercano y cuadrícula de mapeo .....	75
Figura. 8.2. Representación en varias frecuencias de la gráfica en 3D. ....	76
Figura. 9.2.1. Imagen CST 1. ....	77

Figura. 9.2.2. Imagen CST 2. ....	77
Figura. 9.2.3. Imagen CST 3. ....	78
Figura. 9.2.4. Imagen CST 4. ....	78
Figura. 9.2.5. Imagen del modelo 3D de la bobina en CST. ....	78
Figura. 9.2.6. Capturas de la simulación en CST. ....	79

## Resumen:

En este documento se recoge el estudio y la caracterización de ensayos de EMC centrado en el ámbito de la automoción presentes en la norma CISPR 25. Por un lado, se presenta un carácter puramente formativo, haciéndose un recorrido por todos los conocimientos necesarios para entender el mundo de la compatibilidad electromagnética. Por otro lado, se lleva a cabo un ejercicio de ingeniería en el que se diseñan, simulan y construyen los elementos necesarios para realizar ensayos. En último lugar, se concluye con la toma de medidas y la exposición de las conclusiones obtenidas en el proyecto.

## Abstract:

This paper contains the study and characterization of EMC tests, focused on the automotive field and present in the CISPR 25 regulation. On the one hand, it is presented from a purely educational point of view, going through all the knowledge needed to understand the world of electromagnetic compatibility. On the other hand, an engineering exercise is carried out, in which the essential elements to perform tests are designed, simulated and built. Lastly, it concludes with the presentation of the conclusions obtained in the project.



## 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

---

El TFG aborda el estudio y realización prácticas de ensayos EMI/EMC en el sector de automoción, en el marco de colaboración con Fundación I+D Automoción y Mecatrónica (Naitec).

Inicialmente una breve introducción al mundo del electromagnetismo y la compatibilidad electromagnética, seguido por un recorrido de todos los ensayos normativos que se llevan a cabo en Naitec necesarios para el marcado CE de producto eléctrico y electrónico, para posteriormente centrarse en la norma CISPR 25 que recoge los métodos y límites específicos para el ámbito de la automoción según su propio marcado E.

Se ha facilitado por parte de la empresa un componente real que irá implementado en un vehículo, al cual se le somete a los ensayos pertinentes (emisión radiada y campo cercano).

Para ello previamente se diseña e implementa una LISN, lo que conlleva una serie de simulaciones, tanto de algunos de sus componentes como del producto final.

Y finalmente una comparativa de todos los datos recopilados y una conclusión del proyecto realizado.

## 2 EMI Y EMC

---

Hasta 1820 los fenómenos eléctricos y magnéticos estaban considerados como independientes, pero **Hans Christian Oersted** descubrió que ambos estaban relacionados, observando que la orientación de la aguja de una brújula variaba al pasar corriente a través de un conductor próximo a ella.

Los estudios de Oersted concluyeron con que la electricidad y el magnetismo eran manifestaciones de un mismo fenómeno, es decir, que las fuerzas magnéticas procedían de las fuerzas originadas entre cargas eléctricas en movimiento.

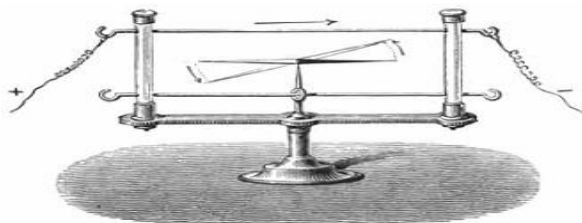


Figura 2.1. Ilustración del ensayo de Hans Christian Oersted (fuente: <https://culturacientifica.com/>)

En 1831 **André-Marie Ampère** descubrió que esto también ocurría de forma inversa y que si existía un campo magnético alrededor de un conductor cerrado se producía una corriente. Pero fue más tarde cuando Michael Faraday demostró que la tensión producida era directamente proporcional a la velocidad con la que cambia el campo magnético.

En 1873 **James Clerk Maxwell** unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos en una única fuerza llamada Electromagnetismo. Inicialmente expuso 20 ecuaciones, hoy reducidas a 4, en las que se observa que existe una onda con dos campos: uno eléctrico y otro magnético oscilando perpendicularmente entre sí.

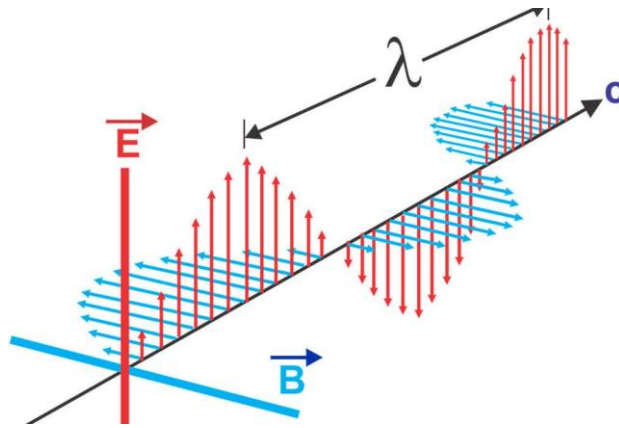


Figura 2.2. Ilustración de campo eléctrico y magnético perpendicular entre sí. (fuente: <https://www.ima-magnets.com/> )

Una vez entendidos los conceptos básicos podemos definir una interferencia electromagnética o EMI (Electromagnetic Interference) como cualquier señal o emisión, radiada en el espacio o conducida a través de un cable de alimentación o señal. Esta perturbación puede interrumpir, degradar o limitar el rendimiento de un sistema o incluso de sistemas cercanos. Para ello se desarrolló el concepto de compatibilidad electromagnética.

La compatibilidad electromagnética o EMC (Electromagnetic Compatibility) es la capacidad de los componentes del equipo electrónico de funcionar correctamente juntos en el entorno electromagnético, es decir que un dispositivo no perjudique en el correcto funcionamiento a otros dispositivos o que estos otros no interfieran en su funcionamiento.

## 2.1 IMPORTANCIA DE LA EMC

A medida que aumenta la proliferación de dispositivos conectados de manera inalámbrica y la electrónica de pequeña señal (más sensible y generalmente de alta frecuencia), la compatibilidad electromagnética (EMC) recibe más importancia. La compatibilidad electromagnética, como se ha comentado anteriormente, es un concepto que evalúa la influencia de diferentes dispositivos electrónicos entre si y que funcionen sin interferir entre ellos. Todos los circuitos electrónicos tienen la capacidad de emitir interferencias eléctricas no deseadas, lo que podría causar problemas para el mismo u otros de los circuitos.

El propósito de las medidas de compatibilidad electromagnética es garantizar que varios equipos electrónicos puedan operar sin causar interferencias innecesarias.

Hay dos elementos básicos de compatibilidad electromagnética:

- El primero son las emisiones: Generación de energía electromagnética no deseada. Para evitar interrupciones en otros dispositivos, deben reducirse por debajo de los límites aceptables.
- El segundo es la inmunidad: La sensibilidad de un dispositivo electrónico a la interferencia electromagnética y si afecta o no a su correcto funcionamiento.

La directiva de compatibilidad electromagnética indica los valores máximos de emisión dependiendo del ambiente en que el dispositivo electrónico va a ser utilizado, y de igual forma existen distintos requisitos de inmunidad que deben ser soportados.

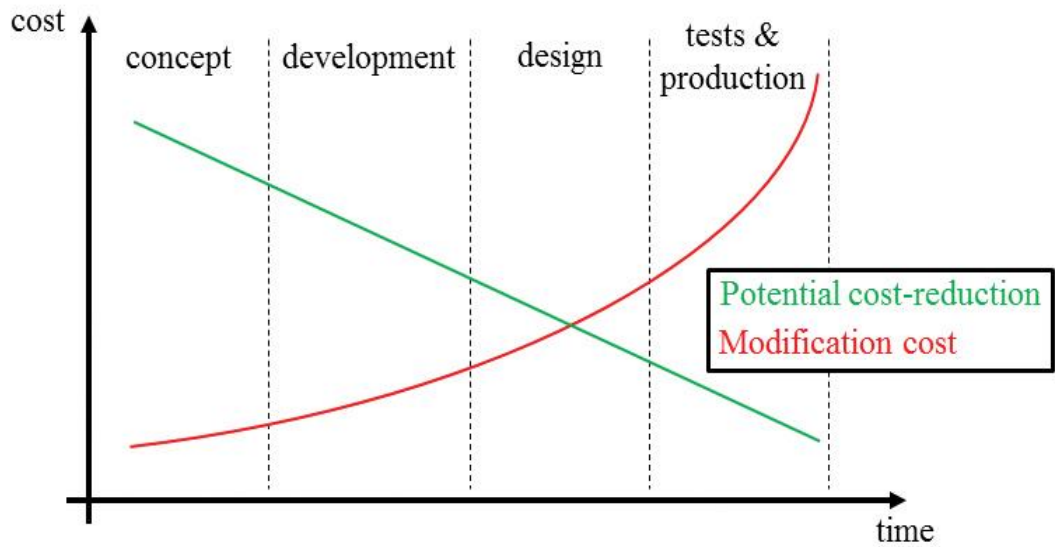


Figura 2.3. Gráfico tiempo-coste (fuente: <https://incompliancemag.com/> )

En esta gráfica puede observarse dos curvas:

- En color rojo representa un caso habitual en el que no se han tenido en cuenta los ensayos de compatibilidad electromagnética durante el diseño y aparecen problemas a la hora de pasar los ensayos de EMC, en muchos casos teniendo que rediseñar partes del dispositivo para poder pasar estos.
- En color verde aparece un caso en el que se ha puesto la atención necesaria al inicio del proyecto, utilizando herramientas de simulación, lo que hace que a la hora de pasar los ensayos normativos aparezcan menos problemas.

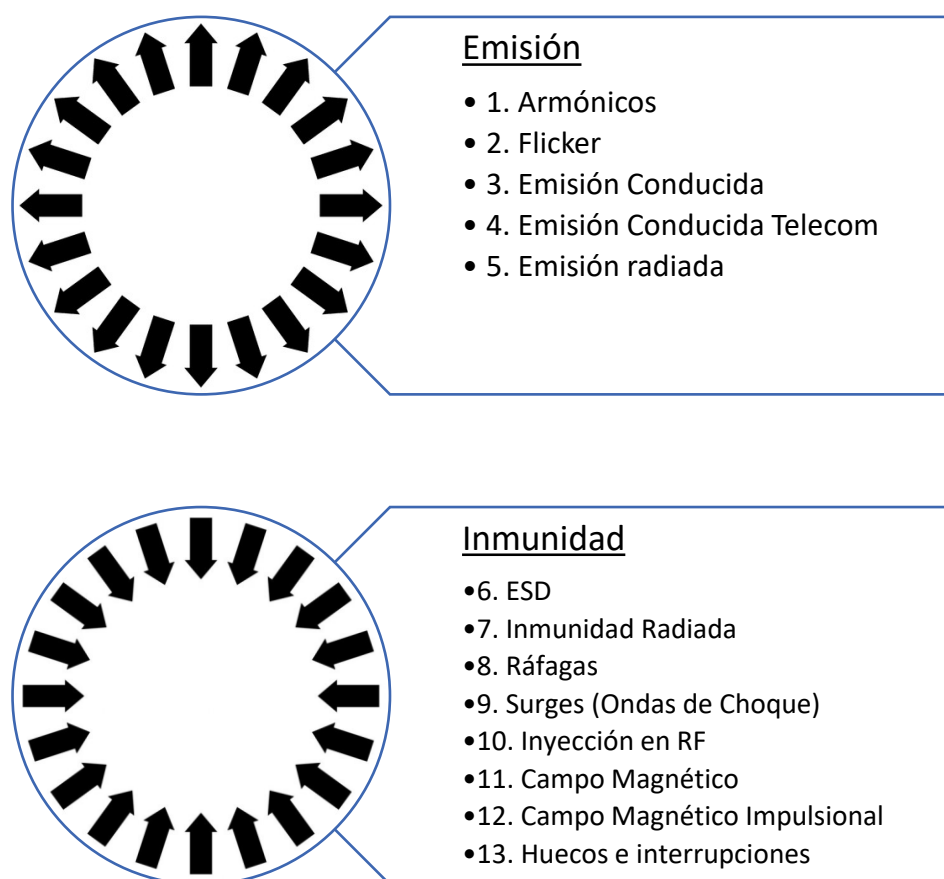
Con esto se quiere señalar la importancia de invertir durante el inicio del proyecto y de utilizar herramientas de simulación que a priori son un desembolso económico importante, pero que a lo largo del tiempo acaba siendo rentable y hace que el proceso de validación del producto sea notablemente más fluido, lo que se traduce en cumplimiento de plazos, evitar rediseños y problemas de producción.

### 3 ENSAYOS DE EMC

---

En este apartado se hace una breve descripción de los ensayos que los que normalmente se aplican a los productos electrónicos para la gestión de su marcado CE. Para ello se ha basado la lista en los ensayos que se efectúan en las instalaciones de la empresa **Fundación I+D Automoción y Mecatrónica (Naitec. S.L.)**

Lista de estos ensayos es:



*Figura. 3.1. Lista de ensayos EMC en Naitec.*

Cabe destacar la importancia de las condiciones climatológicas en este tipo de ensayos, por ello en el laboratorio siempre existen las mismas condiciones de presión, temperatura y humedad, independientemente de la época del año o de las condiciones climáticas del exterior. Esto es esencial para que se pueda cumplir una repetibilidad en las medidas. Los valores de estas condiciones y sus respectivas incertidumbres vienen estipulados en las normas.

### **3.1 ARMÓNICOS**

Este primer ensayo trata de medir de los niveles de las corrientes armónicas inyectadas en la red pública de suministro, a través de los puertos de alimentación (AC) de los equipos eléctricos y electrónicos conectados a las redes públicas de baja tensión, según la norma internacional **UNE-EN 61000-3-2**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, el método de ensayo es aplicable a los equipos eléctricos y electrónicos diseñados para alimentarse a partir de la red eléctrica de baja tensión, a través de puertos de corriente alterna monofásicos o trifásicos, cuya corriente de entrada requerida sea menor o igual a 16 A.

En lo que concierne a la limitación de la corriente armónica, los equipos se clasifican de la siguiente manera:

#### **3.1.1 Clase A**

- Equipos trifásicos equilibrados.
- Equipos electrodomésticos, excepto aquellos aparatos identificados como pertenecientes a la Clase B, C y D.
- Aspiradoras
- Herramientas, a excepción de las herramientas portátiles.
- Reguladores de control de fase independientes.
- Equipos de audio.
- Luminarias profesionales para iluminación escénica y estudios.
- Todos los equipos no especificados como pertenecientes a una de las otras tres clases.

#### **3.1.2 Clase B**

- Herramientas portátiles.
- Equipos de soldadura por arco que no sean equipos profesionales.

#### **3.1.3 Clase C**

- Equipos de iluminación.

#### **3.1.4 Clase D**

Los equipos que tengan una potencia especificada, tal como se define en la norma **UNE-EN 61000-3-2**, inferior a 600 W, de los tipos siguientes:

- Ordenadores personales y pantallas de ordenadores personales.
- Receptores de televisión.

El resultado se expresará como un Conforme (C) o No Conforme (NC), en función del criterio de fallo correspondiente y los límites aplicables especificados por la norma.

### 3.2 **FLICKER (PARPADEO)**

Medir los niveles de las fluctuaciones de tensión y de flicker aplicadas en la red pública de suministro, a través de los puertos de alimentación (AC) de los equipos eléctricos y electrónicos conectados a las redes públicas de baja tensión. **UNE-EN 61000-3-3.**

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, el método de ensayo es aplicable a los equipos eléctricos y electrónicos diseñados para alimentarse a partir de la red eléctrica de baja tensión, a través de puertos de corriente alterna monofásicos cuya corriente de entrada requerida sea menor o igual a 16 A por fase, que presenten una tensión nominal fase-neutro comprendida entre 220 V y 250 V a 50 Hz, y no estén sujetos a una conexión condicional.

Flicker se define como la impresión de inestabilidad de la sensación visual de un estímulo luminoso cuya luminosidad o la distribución espectral fluctúa en el tiempo.

Se mide con:

- $P_{st}$ , o medida del flicker de corta duración: Severidad del flicker evaluada en un período de corta duración (en minutos);  $P_{st} = 1$  es, por convención, el umbral de perceptibilidad.
- $P_{lt}$ , o medida del flicker de larga duración: Severidad del flicker evaluada en un período de larga duración (varias horas) utilizando sucesivos valores de  $P_{st}$ .

Medidor de flicker, o flickermetro es el instrumento diseñado para medir cualquier magnitud representativa del fenómeno de flicker (parpadeo).

El resultado se expresará como un Conforme (C) o No Conforme (NC), en función del criterio de fallo correspondiente y los límites aplicables especificados por la norma.

### **3.3 EMISIÓN CONDUCTIDA**

Medición de los niveles de las señales parásitas conducidas continuas en el rango de frecuencias de 9 kHz a 30 MHz, a través de los puertos de alimentación (AC o DC) de los equipos eléctricos y electrónicos. Según la norma **UNE-EN 55016-2-1**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, el método de ensayo es aplicable a los equipos de Tecnología de la Información (ETI) y a otros equipos eléctricos y electrónicos alimentados a partir de la red eléctrica de baja tensión a través de puertos de corriente alterna, o alimentados a partir de baterías o redes locales de alimentación de corriente continua, a través de puertos de corriente continua.

Equipos de tecnología de la información (ETI):

I. Tienen como función principal una o varias de las siguientes:

entrada, memorización, visualización, recuperación, transmisión, procesamiento, conmutación o control de los datos y de los mensajes de telecomunicación y que pueden ser equipados con uno o más puertos destinados típicamente a la transferencia de información.

II. Con una tensión de alimentación asignada que no exceda de los 600 V.

La norma aplicable a equipos de tecnología de la información (ETI), **UNE-EN 55032**, divide a estos tipos de dispositivos en dos clases:

#### **3.3.1 ETI de clase B**

Los ETI de Clase B están destinados principalmente a ser utilizados en entornos domésticos y pueden incluir:

- Los equipos sin lugares fijos de utilización, por ejemplo, los equipos portátiles alimentados por baterías o pilas incorporadas;
- Los equipos terminales de telecomunicación alimentados por redes de telecomunicación;
- Los ordenadores personales y los equipos auxiliares conectados;

#### **3.3.2 ETI de Clase A**

La clase A de los ETI está constituida por todos los otros dispositivos que no pertenecen a la Clase B, generalmente de entorno industrial.

Los límites para los ETI de clase B son normalmente más restrictivos de los de clase A, debido a la diferencia de ruido presente en ambos ambientes electromagnéticos. Clase B implica un ambiente doméstico, con menor ruido, por lo que se le permite emitir menos. Clase A se refiere a el ambiente industrial, con mayor ruido, por lo que es menos restrictivo.



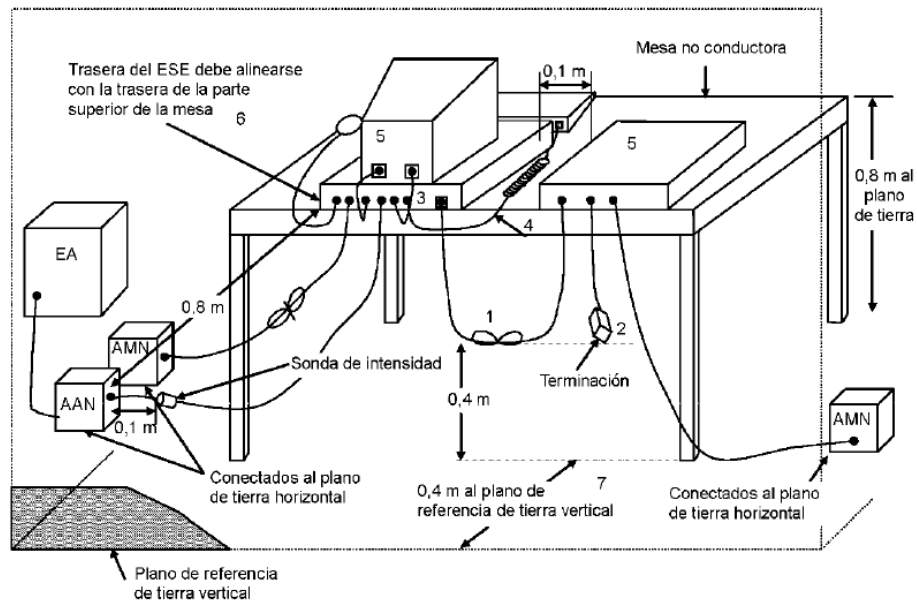


Figura 3.3.1. Disposición para EUT de sobremesa o pared. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

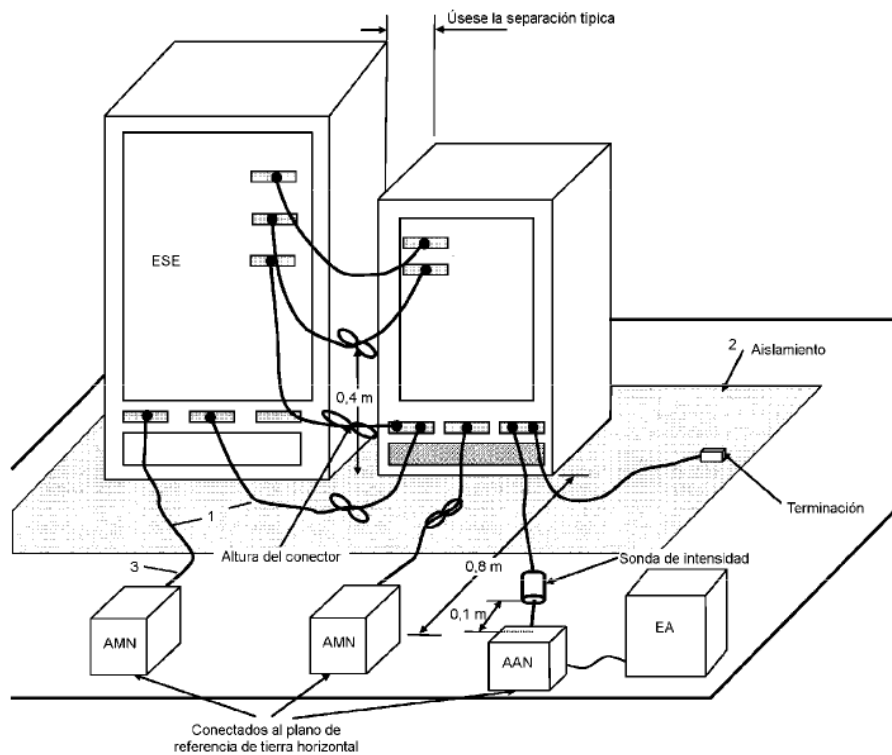


Figura 3.3.2. Disposición para EUT de suelo. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

El resultado se expresará como un Conforme (C) o No Conforme (NC), en función de los límites determinados por cada norma.

### **3.4 EMISIÓN CONDUCTIDA TELECOM**

Medir los niveles de señal parásita conducida en modo común (modo asimétrico), a través del acceso de telecomunicación de los equipos de Tecnología de la Información (ETI) como los definidos en el punto “3.3. *Emisión Conducida*”, y de los equipos eléctricos y electrónicos conectados a redes de telecomunicación multiusuario, redes de área local y redes similares. Dicha medida se llevará a cabo en el rango de frecuencias de 150 kHz a 80 MHz, según la norma **UNE-EN 55016-2-1**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba cubiertos por este método de ensayo, éste es aplicable a los equipos de Tecnología de la Información (ETI), y a otros equipos eléctricos y electrónicos conectados a redes de telecomunicación multiusuario, redes de área local y redes similares. Las redes de estabilización de impedancias empleadas durante los ensayos están diseñadas para la medida de las perturbaciones de radiofrecuencia en líneas de telecomunicación, no apantalladas y de hasta cuatro pares balanceados.

#### **3.4.1 ETI de clase B**

La Clase B de los ETI, está constituida por los ETI que satisfacen los límites de perturbación de la Clase B.

Los ETI de Clase B están destinados principalmente a ser utilizados en entornos domésticos y pueden incluir:

- Los equipos sin lugares fijos de utilización, por ejemplo, los equipos portátiles alimentados por baterías o pilas incorporadas;
- Los equipos terminales de telecomunicación alimentados por redes de telecomunicación;
- Los ordenadores personales y los equipos auxiliares conectados;

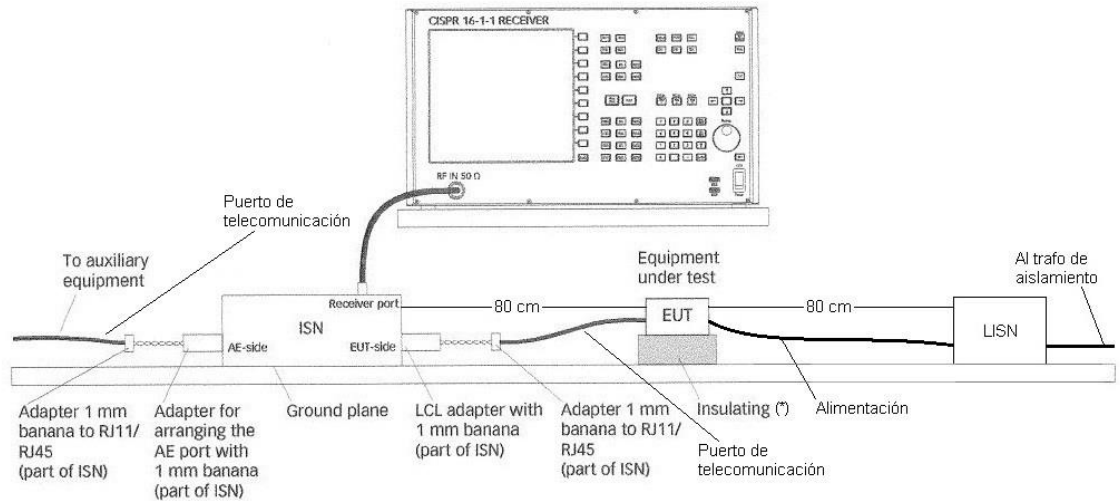
#### **3.4.2 ETI de Clase A**

La clase A de los ETI está constituida por todos los otros dispositivos que no pertenecen a la Clase B, generalmente de entorno industrial, aunque dependerá de la normal que le aplique.

La disposición tanto de los dispositivos de medida como del **EUT**<sup>1</sup> es la siguiente:

---

<sup>1</sup> EUT(ESE): *Equipo sometido a test (Equipment Under test)*



- (\*) - Ensayo en el interior de la cámara semianecoica: distancia de 40 cm al PRTH en el caso de equipos de sobremesa, y de 10 cm en el caso de equipos de sobresuelo; además, el resto de superficies conductoras se mantendrán a 80 cm de distancia del ESE, AE, ISN y LISN, en ambos casos.
- Ensayo en los planos de referencia de tierra del laboratorio: distancia de 80 cm al PRTH en el caso de equipos de sobremesa, y de 10 cm en el caso de equipos de sobresuelo; además, en ambos casos el resto de superficies conductoras se mantendrán a 80 cm de distancia del ESE, AE, ISN y LISN, exceptuando el PRTV, que quedará a 40 cm del borde del ESE y del AE.

Figura 3.4.1 Set up del ensayo de Emisión Conducida Telecom. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

El resultado se expresará como un Conforme (C) o No Conforme (NC), en función de los límites determinados por cada norma.

### **3.5 EMISIÓN RADIADA**

Medir los niveles de emisión de campo electromagnético radiado no intencionado, en el rango de frecuencias de 30 MHz a 6 GHz, de los equipos eléctricos y electrónicos.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, el método de ensayo es aplicable a los equipos eléctricos y electrónicos alimentados a partir de la red eléctrica de baja tensión a través de puertos de corriente alterna, o alimentados a partir de baterías o redes locales de alimentación de corriente continua, a través de puertos de corriente continua, incluidos los equipos de tecnología de la información (ETI). **UNE-EN 55016-2-3.**

#### **3.5.1 ETI de clase B**

La Clase B de los ETI, está constituida por los ETI que satisfacen los límites de perturbación de la Clase B.

Los ETI de Clase B están destinados principalmente a ser utilizados en entornos domésticos y pueden incluir:

- Los equipos sin lugares fijos de utilización, por ejemplo, los equipos portátiles alimentados por baterías o pilas incorporadas.
- Los equipos terminales de telecomunicación alimentados por redes de telecomunicación.
- Los ordenadores personales y los equipos auxiliares conectados.

#### **3.5.2 ETI de Clase A**

La clase A de los ETI está constituida por todos los otros dispositivos que no pertenecen a la Clase B, generalmente de entorno industrial, aunque dependerá de la normal que le aplique.

#### **3.5.3 Set up**

Cuando sea de sobremesa, se colocará sobre una mesa aislante de 80 cm de altura, sobre el plano de metal de referencia horizontal del suelo de la cámara, y a una distancia de al menos 80 cm de cualquier otra superficie metálica o plano de referencia (centro de la plataforma giratoria). Ver *figura 3.5.1*.

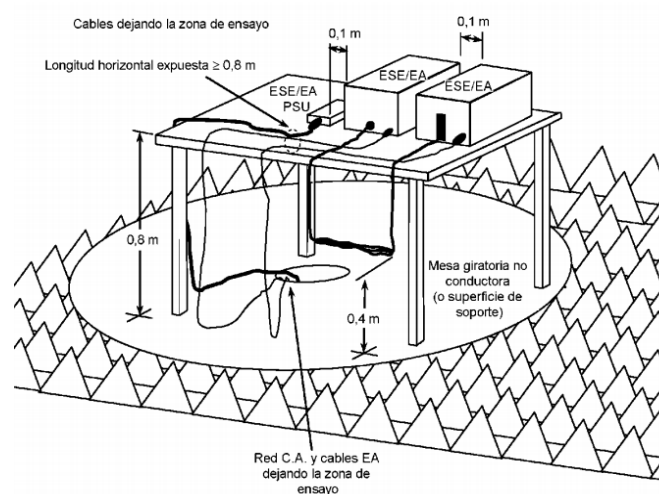


Figura 3.5.1. Set up dispositivo sobremesa. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

Cuando se trate de un equipo de sobresuelo, el equipo se colocará sobre el suelo de la cámara semianecoica, aislado de este mediante un soporte de 10 cm de altura y a una distancia de al menos 80 cm de cualquier otra superficie metálica o plano de referencia (centro de la plataforma giratoria). Ver figura 3.5.2.

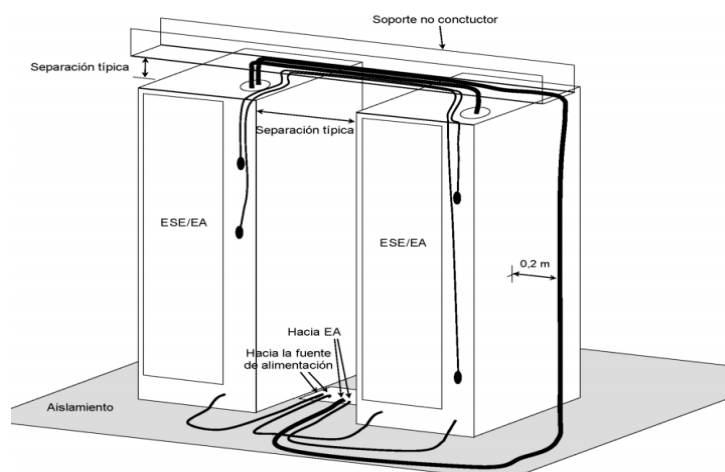


Figura 3.5.2 Set up dispositivo sobresuelo. (fuente: Métodos de ensayo Naitec).

El EUT, siempre que sus dimensiones lo permitan, será colocado de tal forma que la distancia entre el perímetro del equipo sometido a ensayo y el punto de medida de la antena sea de 3 m.

Se efectuará la medida en el rango de frecuencias preestablecido:

### 3.5.4 Rango 30MHz-1GHz:

- Tiempo de medida: 10 ms.
- Paso en frecuencia: lineal de 60 kHz.
- Ancho de banda de resolución: 120 kHz.

- Número de barridos para medida en dominio temporal: 10 mínimo.
- Límites de las perturbaciones radiadas por debajo de 1 GHz
- Medida de pico y quasi-pico:

- **Pico:**

Como su nombre indica, el detector de pico responde casi instantáneamente al valor de pico de la señal medida. También se conoce como el detector de envolvente porque su salida sigue la envolvente de la señal. De todos los tipos de detector, es el detector más rápido de respuesta y proporciona la medida de amplitud más alta. El detector de pico retiene el valor de pico de cada armónico de la señal, indicando el peor caso de la medida, es decir, el valor máximo.

- **Quasi-pico:**

El detector de quasi-pico (QP) es como el detector de pico, excepto que tiene una carga ponderada y una constante de tiempo de descarga. El tiempo de carga es mucho más rápido que el tiempo de descarga. Cuanto más alta sea la tasa de repetición de los impulsos de la señal de entrada medida, mayor será la amplitud que se leerá en el receptor de EMI o en la pantalla del analizador de espectro. Para obtener una lectura precisa, la medición de quasi-pico debe detenerse en cada frecuencia un tiempo sustancialmente más largo que el requerido si se usa el detector de pico. El tiempo de permanencia más largo del detector de quasi-pio ralentiza las medidas de EMI.

### **3.5.5 Rango 1GHz-6GHz:**

- tiempo de medida: 10 ms.
- paso en frecuencia: automático.
- ancho de banda de resolución: 1MHz.
- Número de barridos para medida en dominio temporal: 10 mínimo.
- Límites de las perturbaciones radiadas por encima de 1GHz
- Medidas de pico y average.
- (AV: **Average**):

El detector de promedio o de media simplemente mide el valor promedio de la señal de entrada. El valor promedio de una señal continua (CW) medirá el mismo valor que el que se obtiene con un detector de pico o de quasi-pico. Con los tipos de señales impulsivas se medirán valores más bajos que con el detector de pico cuando se use el detector promedio.

### 3.6 ESD

Ensayo que se realiza para evaluar el comportamiento de los equipos eléctricos y electrónicos de uso doméstico, comercial e industrial, cuando se hallan sometidos a descargas de electricidad estática, ya sean directas (producidas directamente por los operadores), o indirectas (entre objetos situados en las proximidades), según la norma internacional **UNE-EN 61000-4-2**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, este método de ensayo es aplicable a equipos, sistemas, subsistemas y periféricos que puedan verse involucrados en descargas de electricidad estática debidas a las condiciones ambientales y de instalación, tales como la baja humedad relativa, uso de alfombras de baja conductividad (fibra artificial), fundas de vinilo, etc., que puedan existir en localizaciones clasificadas en normas relativas a equipos eléctricos y electrónicos.

Este es el ensayo más sensible a cambios de temperatura y humedad por lo que en el laboratorio debe haber un control exhaustivo de estos parámetros.

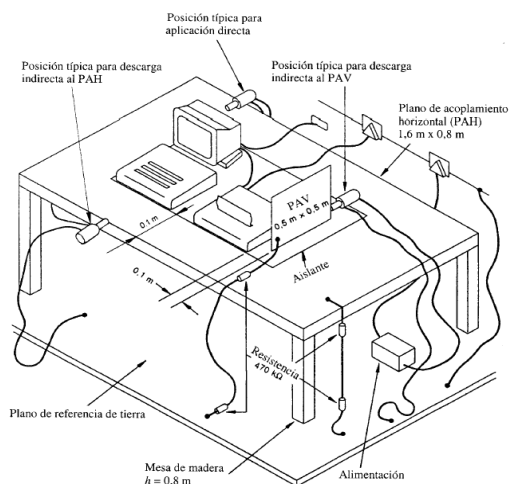


Figura. 3.6.1. Ensayo ESD de EUT en mesa (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

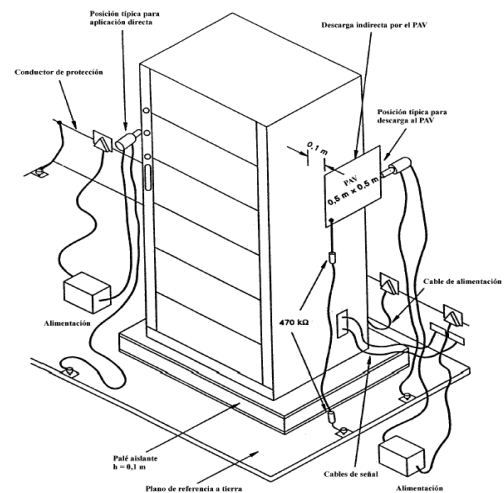


Figura. 3.6.2. Ensayo ESD de EUT en suelo (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

#### A. Aplicación directa:

Las descargas de electricidad estática se aplicarán sólo en los puntos y en las superficies del EUT que sean accesibles para las personas durante su utilización normal. Se distingue entre ESD directas de contacto (sobre superficies accesibles y conductoras) y ESD directas al aire (sobre superficies accesibles no conductoras).

#### B. Aplicación indirecta:

Las descargas indirectas se simularán aplicando las descargas del sistema simulador de ESD a los planos de acoplamiento, de mismo modo que si se ejecutara una descarga por contacto.

- Plano horizontal
- plano vertical

Para todos los ensayos referentes a inmunidad existen distintos niveles de aptitud, según el uso del dispositivo será recogido por una norma distinta, la cual le otorgará un nivel de aptitud de estos tres:

<b><u>Criterio</u></b>	<b><u>Definición</u></b>
A	Debe continuar funcionando como estaba previsto durante y después del ensayo. Ninguna degradación de funcionamiento ni pérdida de la funcionalidad.
B	Debe continuar funcionando como estaba previsto después del ensayo
C	Una pérdida de función temporal es admisible, siempre que esta sea recuperable o pueda restablecerse mediante una intervención en los controles.

*Figura. 3.6.3 Tabla de criterio de aptitud en inmunidad radiada. (fuente: UNE EN 61000-6-1:2007).*

Para este ensayo en concreto el criterio de aceptación suele ser de tipo B.



### 3.7 INMUNIDAD RADIADA

Ensayo que sirve para evaluar el comportamiento de los equipos eléctricos y electrónicos cuando se hallan sometidos a ciertos niveles de energía electromagnética radiada, según la norma internacional **UNE-EN 61000-4-3**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, se aplica a equipos eléctricos y electrónicos en general, que puedan verse sometidos a campos electromagnéticos de frecuencias radioeléctricas, generadas por fuentes externas, transmisores de radio, televisión, diversas fuentes electromagnéticas industriales e incluso otros componentes electrónicos (como se ha podido ver en el apartado “3.5. Emisión radiada.”).

Los siguientes niveles de campo eléctrico que limitarán el alcance de este método de ensayo:

**Rango de frecuencias de 80 MHz a 1 GHz:** (Campo eléctrico  $\leq 10$  V/m).

Para aquellos ensayos que se efectúen en el rango de frecuencias entre 80 MHz y 1 GHz, la punta de la antena ETS 3142E (BiConiLog, un híbrido entre bicónica y log-periódica) se colocará a 155 cm con respecto al suelo de la cámara anecoica (PRT). Además, se situará a una distancia de 145 cm del área de campo uniforme de la cámara.



Figura. 3.7.1. Antena BiConiLog (fuente: <https://www.altoo.dk/> )

I. **Rango de frecuencias de 1 GHz a 6 GHz:** (Campo eléctrico  $\leq 10$  V/m).

Cuando se trate de ensayos en el rango de frecuencias entre 1.4 GHz y 6 GHz, la punta de la antena STLP9149 (stacked log-periódica) se colocará a 130 cm con respecto al suelo de la cámara.



Figura. 3.7.2. Antena stacked log-periódica (fuente: <https://www.scientificindia.com/> )

Además, dicho extremo de la antena se situará una distancia de 290 cm del área de campo uniforme de la cámara anecoica.

La cámara se compone de una estructura conductora que hace de jaula de Faraday, a la vez que tiene todas sus caras internas recubiertas de ferritas y absorbentes, con lo que se consigue eliminar los rebotes de las ondas electromagnéticas.

El suelo es la única cara que no está recubierta de estos materiales, por lo que hay que añadir ferritas y absorbentes para este ensayo. Lo que a priori parece un fallo, no lo es porque otorga a la cámara de polivalencia para efectuar otros ensayos de radiadas.

Para el ensayo por debajo de 1 GHz es suficiente con cubrir el suelo con ferritas, para lo cual se utilizan unos carros (*Imagen 3.7.3*) que facilitan el proceso de montaje y desmontaje. Pero ocurre que a frecuencias por encima de 1 GHz las ferritas empiezan a rebotar las ondas por lo que es necesario colocar absorbentes similares a los que encontramos en las paredes de la cámara (*Imagen 3.7.4*)



Figura. 3.7.3 Carros de ferritas en la cámara (<1GHz)



Figura. 3.7.4 Absorbentes encima de los carros(>1GHz)

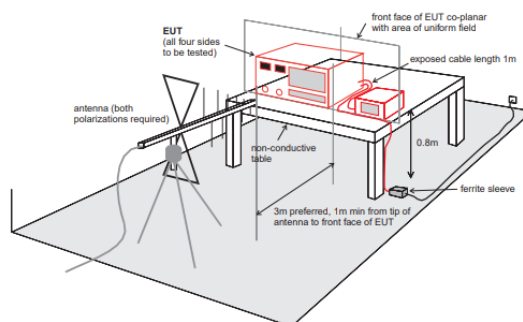


Figura. 3.7.5 Ilustración del set up del ensayo de Inmunidad Radiada (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

Como bien se ha comentado en el apartado anterior “ 3.6. ESD “, existen criterios de aceptación. Para el resto de los ensayos mencionados a posterior se hará referencia ese apartado. En este ensayo normalmente se exige un criterio de clase A.

### 3.8 RÁFAGAS

Ensayo que se realiza para caracterizar la respuesta de sistemas, equipos, aparatos y subsistemas eléctricos o electrónicos a transitorios rápidos en ráfagas según la norma internacional **UNE-EN 61000-4-4**.

El método de ensayo está destinado a demostrar la inmunidad de equipos eléctricos y electrónicos sometidos al tipo de perturbaciones transitorias tales como las originadas por transitorios de conmutación (interrupción de cargas inductivas, rebote de contactos en relés, etc.) en las puertas de alimentación, de señal y de control.

Se introducen ráfagas de corriente (*Imagen 3.8.1*) en los cables de alimentación y señal y se observa si el dispositivo resulta o no inmune a ellas.

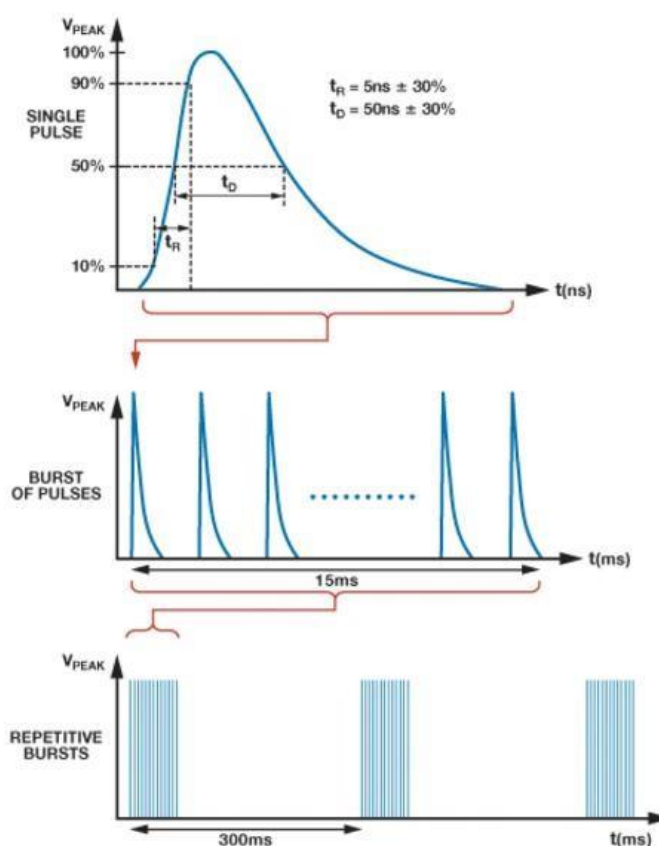


Figura. 3.8.1. Señal de las ráfagas introducidas (fuente: <https://croydonservice.com/emc-immunity/1446/>)

El ensayo puede realizarse con el EUT de sobre mesa o en el suelo según sea su uso habitual, la norma indica que es preferible utilizar CDN<sup>2</sup> (*Imagen 3.8.2*), pero en multitud de casos no se dispone de una específica, por lo que se debe utilizar una pinza de acoplamiento capacitivo (*Imagen 3.8.3*).

<sup>2</sup> CDN (RAD): Red de acoplamiento y desacoplamiento integrada en una unidad.

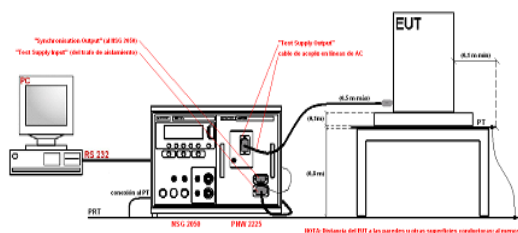


Figura. 3.8.2. CDN interna. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

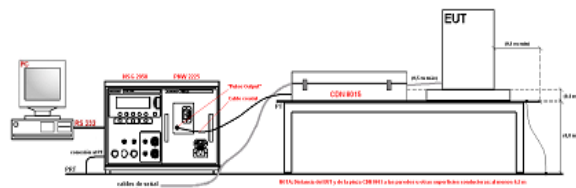


Figura. 3.8.3. pinza en el cable de señal. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

El EUT deberá funcionar de manera correcta durante el ensayo, esto determinará que el resultado sea conforme (C) o no conforme (NC).

En este ensayo normalmente se exige un criterio de clase B.

### 3.9 SURGES (ONDAS DE CHOQUE)

Evalúa el comportamiento de los equipos eléctricos y electrónicos conectados a las redes de baja tensión, solamente en condiciones de funcionamiento, cuando se hallan sometidos a perturbaciones de alta energía en las líneas de potencia y de interconexión, según las normas internacionales **UNE-EN 61000-4-5**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, este método de ensayo es aplicable a equipos, sistemas, subsistemas y periféricos eléctricos y electrónicos que puedan verse involucrados en ondas de choque<sup>3</sup> unidireccionales causadas por sobretensiones transitorias de tipo rayo (atmosféricas) y de tipo maniobra.

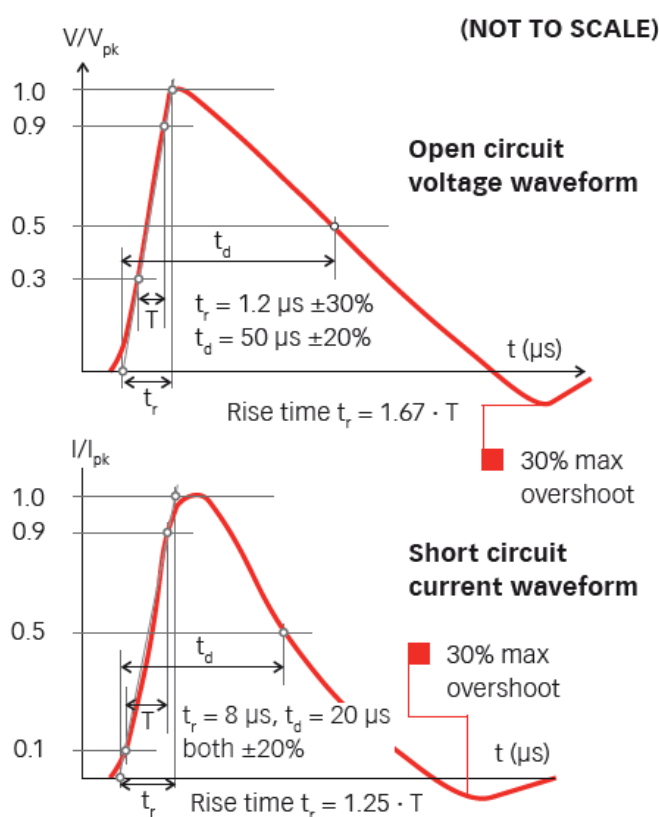


Figura 3.9. Señal aplicada en el ensayo. (fuente: TESEQ).

Es importante destacar los siguientes conceptos:

1. Duración del frente de una onda de choque de tensión (tensión de choque): La duración del frente  $T_r$  de una onda de choque de tensión es un parámetro convencional definido como 1,67 veces el intervalo  $T$  entre los instantes a los cuales el impulso se encuentra entre el 30% y el 90% de su valor de cresta.

<sup>3</sup> Onda de choque: Onda transitoria de corriente, tensión, o potencia que se propaga a lo largo de una línea o circuito, la cual se caracteriza por un rápido incremento seguido de un decrecimiento más lento.

2. Duración del frente de una onda de choque de corriente (corriente de choque): La duración del frente  $T_r$  de una onda de choque de corriente es un parámetro convencional definido como 1,25 veces el intervalo  $T$  entre los instantes en los cuales el impulso se encuentra entre el 10% y el 90% de su valor de cresta.
3. Tiempo de subida: El intervalo de tiempo entre los momentos en los que el valor instantáneo del impulso alcanza por primera vez un valor inferior determinado (generalmente el 10% de la magnitud del impulso) y después un valor superior determinado (generalmente el 90% de la magnitud del impulso).
4. Tiempo transcurrido hasta el valor mitad  $T_d$ : Se define para una onda de choque como el intervalo de tiempo entre el origen virtual  $O_1$  y el instante en el cual la tensión o la corriente han decrecido hasta la mitad del valor de cresta.
5. Líneas de interconexión: Comprenden:
  - a. líneas de E/S;
  - b. líneas de comunicación;
  - c. líneas equilibradas.

El número de pulsos a aplicar será de al menos 5 en polaridad positiva y 5 en polaridad negativa. La frecuencia de repetición (el tiempo entre dos ondas de choque y el tiempo de recuperación) de ensayo será, como máximo, 1 por minuto.

Salvo especificación contraria, las ondas de choque se aplicarán sincronizadas con la fase de la tensión al pasar por  $0^\circ$  y a  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ .

Las ondas de choque se aplicarán normalmente entre línea y línea, y entre línea(s) y tierra.

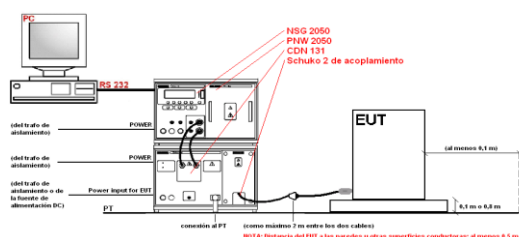


Figura 3.9.2. Set up Surges. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

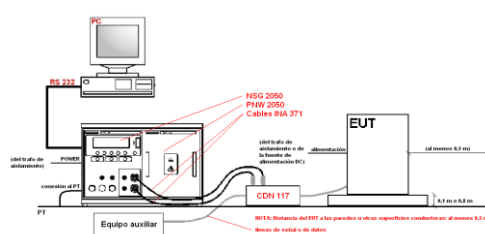


Figura 3.9.3 Set up Surges con equipo auxiliar. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

El resultado se expresará como un Conforme (C) o No Conforme (NC), en función del criterio de fallo correspondiente. En este ensayo normalmente se exige un criterio de clase B.

### 3.10 INYECCIÓN EN RF

Ensayo que se realiza para caracterizar la respuesta de sistemas, equipos, aparatos y subsistemas eléctricos o electrónicos a campos electromagnéticos conducidos desde 150 KHz hasta 80 MHz según las normas internacionales **UNE-EN 61000-4-6**, ampliable hasta los 230MHz según el EUT.

Este método de ensayo es aplicable a equipos que tienen al menos un interfaz al que se pueda conectar un conductor y al que se puedan acoplar campos RF a través de los cables conectados a el mismo (cables de alimentación, conexiones a tierra, líneas de señales, etc.)

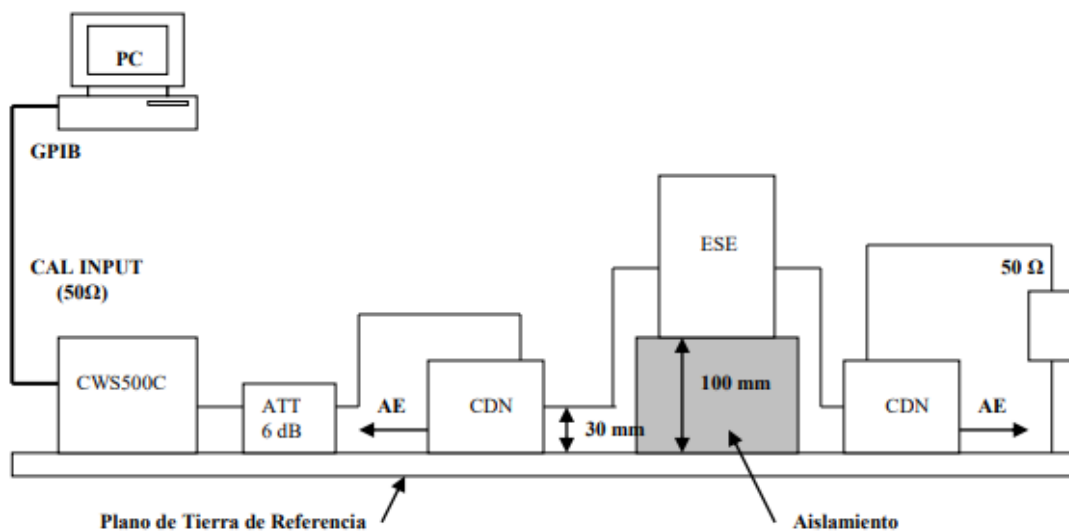


Figura 3.10. Set-up típico de ensayo de inyección en RF (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

La norma indica que siempre y cuando no se dispongan de las unidades de acoplo necesarias (CDN) se dispondrá el EUT con la pinza electromagnética, **EMClamp**<sup>4</sup>, sobre el cable adecuado a una distancia inferior a los 10cm del ESE. En este ensayo normalmente se exige un criterio de clase A.

<sup>4</sup> EMClamp (Pinza electromagnética): Dispositivo de inyección con acoplamiento combinado inductivo y

### 3.11 CAMPO MAGNÉTICO

Ensayo que se realiza para evaluar el comportamiento de los equipos eléctricos y electrónicos de uso doméstico, comercial e industrial, solamente en condiciones de funcionamiento, cuando se hallan sometidos a campos magnéticos radiados a la frecuencia industrial (50– 60 Hz) ya sean continuos o de corta duración, según la norma internacional **UNE-EN 61000-4-8**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba sobre los cuales se puede aplicar este método de ensayo, conviene distinguir dos casos:

- El ensayo bajo un campo magnético continuo, aplicable a todo tipo de equipos, destinados a las redes públicas o industriales de baja tensión o a las centrales eléctricas.
- El ensayo bajo campos magnéticos de corta duración se aplica principalmente a los equipos que han de ser instalados en lugares expuestos de las centrales eléctricas.

En cualquier caso, este método de ensayo sólo será aplicable sobre equipos cuyo volumen, como máximo, sea de 0.6 m x 0.6 m x 0.5 m, y empleando campos magnéticos de un nivel máximo de 40 A/m, ya sean de tipo continuo o de corta duración.

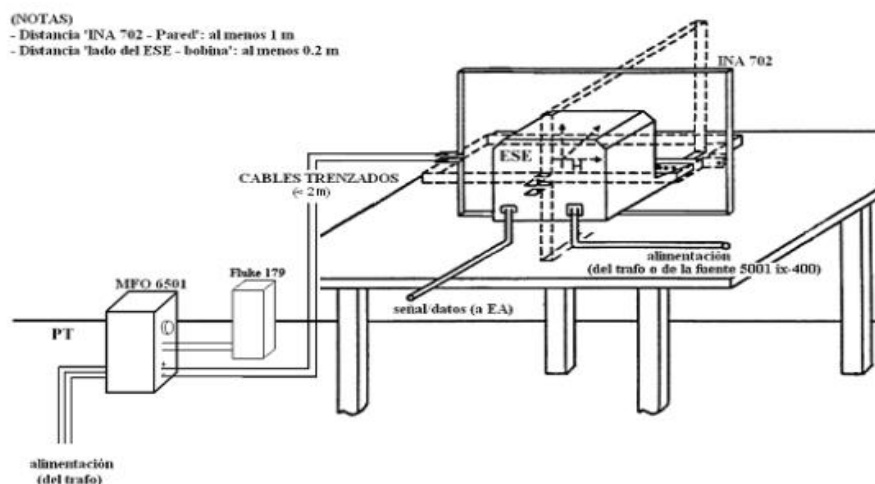


Figura. 3.11. Ilustración de ensayo de campo magnético. (fuente: Métodos de ensayo Naitec)

El EUT deberá funcionar de manera correcta durante el ensayo, esto determinará que el resultado sea conforme (C) o no conforme (NC). En este ensayo normalmente se exige un criterio de clase B.



### **3.12 CAMPO MAGNÉTICO IMPULSIONAL**

Ensayo que sirve para evaluar el comportamiento de los equipos eléctricos y electrónicos cuando se hallan sometidos a campos magnéticos radiados de carácter impulsional, según la norma internacional **UNE-EN 61000-4-9**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba este método de ensayo es aplicable a aquellos equipos que puedan verse involucrados en los efectos de perturbaciones magnéticas impulsionales relativas principalmente a:

- 1) Instalaciones industriales y centrales eléctricas;
- 2) Subestaciones de media y baja tensión.

La aplicación de este método de ensayo puede extenderse a equipos que se encuentren en circunstancias diferentes de las explicadas, dependiendo de la posibilidad de la presencia del fenómeno que simula el ensayo, o de otras aplicaciones que puedan considerar los comités de producto.

En cualquier caso, este método de ensayo sólo será aplicable sobre equipos cuyo volumen, como máximo, sea de 0.6 m x 0.6 m x 0.5 m, y empleando campos magnéticos de un nivel máximo de 1000 A/m (valor de cresta).

El set up de este ensayo es similar al descrito en el apartado “**3.11. Campo Magnético**”. En este ensayo normalmente también se exige un criterio de clase B.

### 3.13 HUECOS E INTERRUPCIONES

Evalúa el comportamiento de los equipos eléctricos y electrónicos conectados a las redes de baja tensión, solamente en condiciones de funcionamiento, cuando se hallan sometidos a los huecos de tensión<sup>5</sup>, las interrupciones breves<sup>6</sup> y las variaciones de tensión, según la norma internacional **UNE-EN 61000-4-11**.

En cuanto a los dispositivos bajo prueba, este método de ensayo es aplicable a equipos, sistemas, subsistemas y periféricos que puedan verse involucrados en huecos de tensión, interrupciones breves y variaciones de tensión debidas a faltas de la red de alimentación, durante su instalación o por cambios repentinos e importantes de la carga.

En cualquier caso, este método de ensayo sólo será aplicable sobre equipos conectados a las redes de baja tensión (a 50 Hz o 60 Hz), o con una corriente de alimentación asignada menor o igual a 16 A por fase.

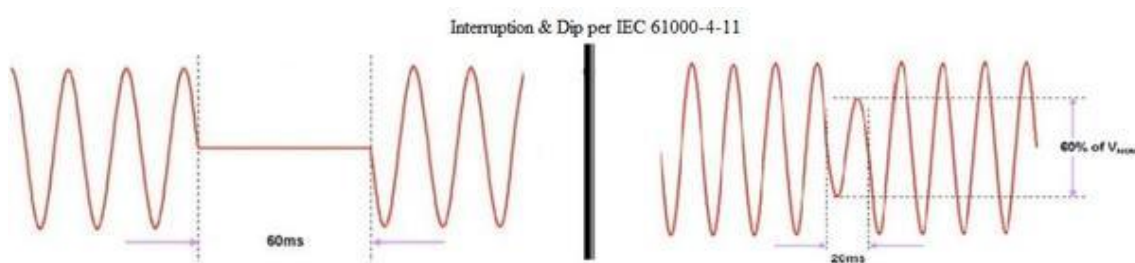


Figura. 3.13. Ilustración de señal aplicada en el ensayo de Huecos e Interrupciones. (fuente: <https://transientspecialists.com/> )

Para efectuar este ensayo se requiere del software SPS EMC 4.1 y el resultado se expresará como un Conforme (C) o No Conforme (NC), en función del criterio de fallo correspondiente. En este ensayo normalmente se exige un criterio B y/o C.

---

<sup>5</sup> Hueco de tensión: Brusca reducción de la tensión en un punto de la red eléctrica, seguida de un restablecimiento después de una corta duración, desde un semiperiodo hasta algunos segundos.

<sup>6</sup> Interrupción breve: Desaparición de la tensión de alimentación durante un tiempo que no debe pasar de 1 min. Las interrupciones breves pueden ser consideradas como un hueco de tensión de amplitud 100%.

## 4 CISPR 25

La norma **CISPR 25: 2016** contiene límites y procedimientos para la medición de perturbaciones de radio en el rango de frecuencia de 150 kHz a 2500 MHz. La norma se aplica a cualquier componente eléctrico o electrónico diseñado para su uso en vehículos, embarcaciones y motores de combustión interna.

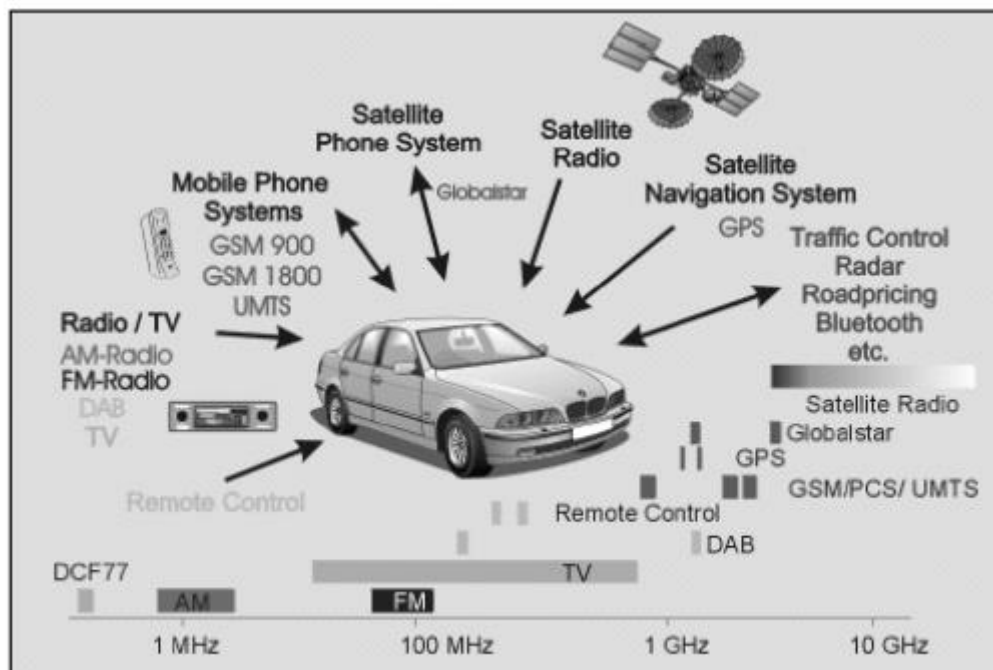


Figura. 4.1. Interferencias en un vehículo. (fuente: “Diseño e implementación de un sistema completo de medida de antenas en campo abierto.” Autor: Víctor Mata García.)

### 4.1 INTRODUCCIÓN A CISPR 25

Los estándares de automoción que abordan la compatibilidad electromagnética (EMC) son desarrollados principalmente por CISPR, ISO y SAE. CISPR e ISO son organizaciones que desarrollan y mantienen estándares para su uso a nivel internacional. SAE desarrolla y mantiene estándares principalmente para su uso en América del Norte.

Cada fabricante de vehículos tiene estándares corporativos internos que especifican los niveles y las pruebas que deben cumplir los componentes utilizados en sus vehículos. Al igual que con las normas gubernamentales, estos documentos generalmente se refieren a los documentos CISPR e ISO con diferencias en el alcance o niveles de prueba.

CISPR 25 no se utiliza normalmente con fines reglamentarios, sino que los fabricantes de vehículos lo utilizan habitualmente para garantizar un buen rendimiento de los receptores montados a bordo del vehículo. Si la radio montada en el vehículo, bote u otro dispositivo no funciona de manera fiable, la satisfacción del consumidor y, en última instancia, las ventas de productos podrían verse afectadas.

Esta norma tiene dos partes:

- Una parte trata de una prueba completa de vehículo o sistema en la que las antenas montadas en el vehículo se utilizan para detectar el ruido generado por los diferentes sistemas eléctricos y electrónicos montados en el mismo vehículo.
- La otra sección de la norma se ocupa de las mediciones conducidas y radiadas de componentes y módulos de vehículos. En este apartado, nos centraremos en la sección de prueba de emisiones radiadas.

CISPR 25 establece que el nivel de ruido electromagnético en el área de prueba debe ser 6 dB más bajo que el límite aplicable. Algunos de los límites de emisiones radiadas que se encuentran en esta norma son tan bajos como 18 dB ( $\mu\text{V} / \text{m}$ ). Esto significa que el ruido ambiental debe ser de 12 dB ( $\mu\text{V} / \text{m}$ ) como máximo para un entorno compatible. Se utiliza por tanto una cámara semianecoica, usada típicamente para mantener las señales de RF del entorno externo fuera del área de prueba, de modo que el equipo bajo prueba (EUT) siga siendo la fuente dominante de cualquier interferencia radiada.

## 4.2 LIMITACIONES EN NAITEC

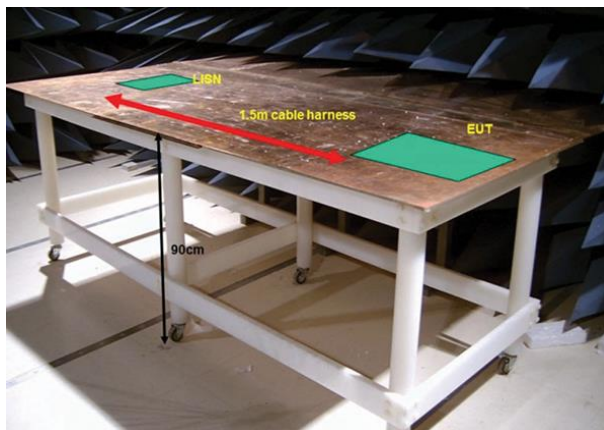
De los ensayos mencionados en el apartado anterior “3. Ensayos de EMC” sólo unos pocos son contemplados en la norma CISPR 25. En la siguiente lista de ensayos podemos ver cuáles son:

Conducidas	Radiadas
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Inyección en RF	<input type="checkbox"/> Campo magnético
<input type="checkbox"/> Ráfagas	<input type="checkbox"/> Campo magnético impulsional
<input type="checkbox"/> ESD	<input type="checkbox"/> Inmunidad radiada
<input type="checkbox"/> Huecos e interrupciones	<input type="checkbox"/> Emisión radiada
<input type="checkbox"/> Surges	
<input type="checkbox"/> Emisión conducida	
<input type="checkbox"/> Armónicos	
<input type="checkbox"/> Flicker	
<input type="checkbox"/> Emisión Conducida Telecom	

Figura. 4.2.1. Lista de ensayos EMC (referente a CISPR 25 en rojo)

Se puede ver como la norma no hace referencia a todos los ensayos comentados, porque muchos de ellos se refieren a fenómenos electromagnéticos que en raras ocasiones se producen en el interior de un vehículo. Es por ello por lo que se hace alusión especial a los ensayos de radiadas, es decir, los que hemos comentado anteriormente que se realizan dentro de la cámara anecoica.

El diseño y las dimensiones de la cámara anecoica se rigen por el estándar descrito en la norma CISPR 25. Se deben seguir varias pautas al dimensionar la cámara y el punto de partida es el EUT, que determina el tamaño del banco de pruebas. La *Figura 4.2.2* muestra un banco de pruebas típico utilizado en una cámara de tipo CISPR 25.



*Figura. 4.2.2. Mesa conductora CISPR 25 (fuente: <https://incompliancemag.com/> )*

Los cables se enrutan en un mazo de cables que se coloca a lo largo del borde frontal del banco. El mazo de cables en sí es un componente importante del EUT y es el componente principal iluminado por la antena de medición, ya que a las frecuencias evaluadas por los ensayos radiados de la CISPR 25, el acoplamiento principal a los campos radiados se producirá a través de los cables que alimentan el dispositivo.

- La *figura 4.2.3* muestra cómo se determina el tamaño de la mesa. La superficie del plano de tierra debe extenderse hasta el plano de tierra, normalmente unido eléctricamente a la pared de la cámara. Sin embargo, la norma permite que el banco se conecte a tierra al suelo como alternativa.
- La principal limitación en la cámara semianecoica de Naitec se encuentra en la distancia existente entre los absorbentes de las paredes de la cámara y el plano de la mesa. Esta distancia debe ser de al menos un metro.
- El ancho mínimo del plano de tierra de referencia (mesa) para las emisiones radiadas será de 1000 mm, la longitud mínima del plano de tierra para las emisiones radiadas será de 2000 mm. Debe estar construido de cobre, latón o acero galvanizado y de al menos 0.5 mm de espesor. El plano de tierra debe estar unido a la masa de la cámara anecoica de manera que la resistencia no exceda de 2.5 m $\Omega$ , además de no estar a una distancia mayor de 0.9m.

Los cables deberán estar sobre una superficie aislante y una altura de 50mm del plano de tierra de la mesa.

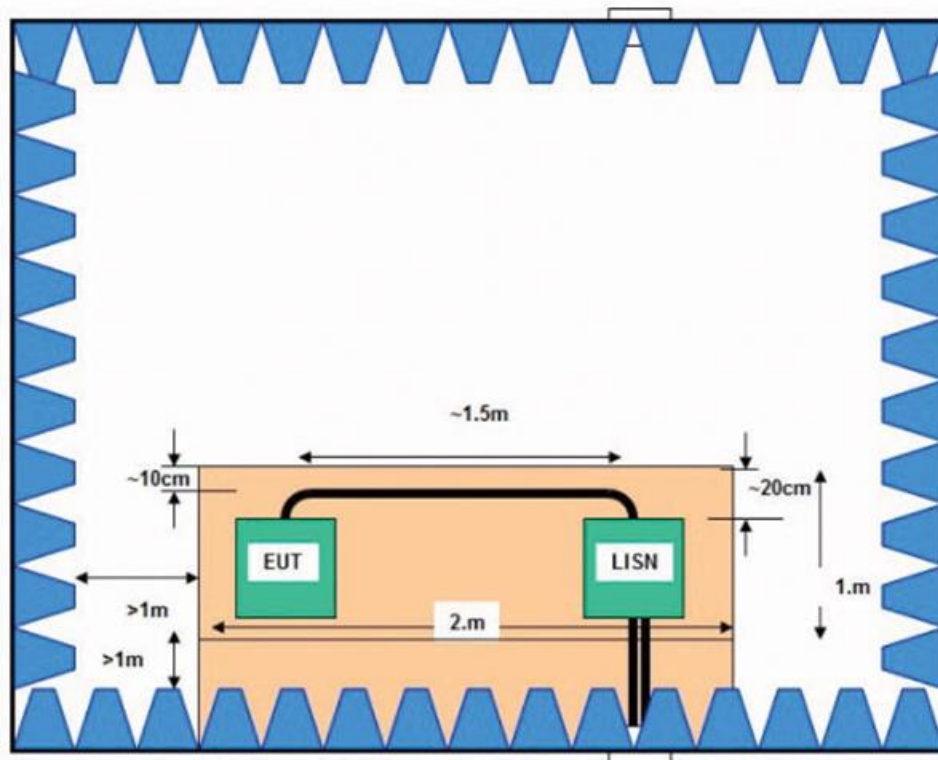


Figura. 4.2.3 Dimensiones de la mesa conductora CISPR 25, plano cenital (fuente: Norma CISPR 25)

- Respecto a la altura de la cámara, la otra regla establece que ninguna parte de la antena puede estar a menos de 1 m de distancia de las puntas del material absorbente. La altura de la cámara estará condicionada por las dimensiones de la antena más larga. La antena más larga suele ser la de tipo monopolo de varilla activa. El monopolo se utiliza con un plano de tierra extremadamente pequeño eléctricamente. Según el estándar, la varilla monopolo tiene aproximadamente 80 cm de longitud y está colocada de manera que el plano del suelo esté al mismo nivel que el banco que, como sugiere la Figura 4.2.4, tiene una altura nominal de 90 cm. La regla de 1 m para la separación entre la antena y la punta del absorbente determinará nuevamente el tamaño de la cámara.

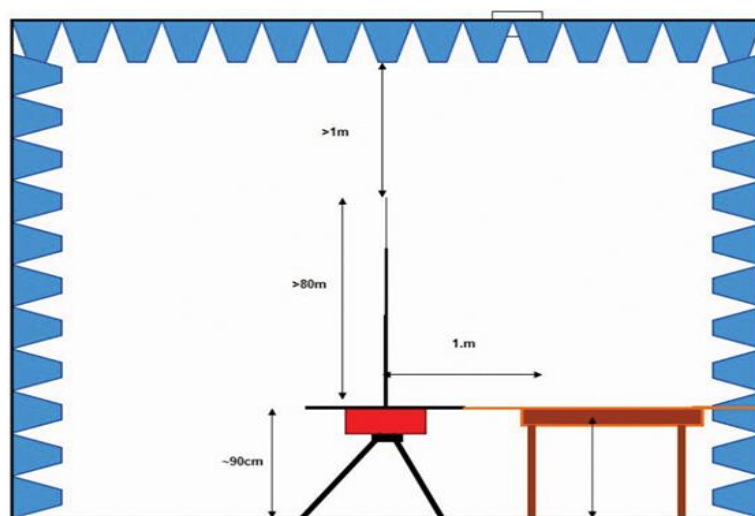


Figura. 4.2.4. Set up varilla mono polo activa. (fuente: Norma CISPR 25)

- Antenas:

### ANTENA:

### FRECUENCIA:



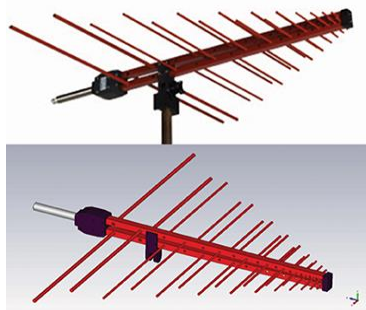
Para bajas frecuencias, se prefiere una antena monopolar de varilla activa.

Figura. 4.2.5. Antena Monopolo (fuente: <https://incompliancemag.com/> )



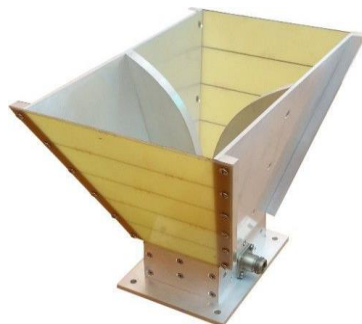
A frecuencias entre 30 MHz y 200 MHz, una antena bicónica típica es la antena recomendada.

Figura. 4.2.6. Antena bicónica (fuente: <https://incompliancemag.com/> )



De 200 MHz a 1 GHz, la antena de elección es una LPDA

Figura. 4.2.7. Antena Log periódica (fuente: <https://incompliancemag.com> )



Por encima de 1Ghz de utiliza una antena de bocina

Figura. 4.2.8. Antena de bocina (fuente: <https://incompliancemag.com/> )

- Distancia de antena a mazo de cables: La distancia de 1 m al mazo de cables se mide desde el eje de los elementos de la antena para la varilla monopolo y la antena bicónica. Para la matriz de dipolos logarítmicos periódicos (LPDA), la distancia se mide desde la punta de la antena y para las antenas de bocina, la distancia se mide desde la cara frontal o el plano de apertura de la antena. Además de la distancia frontal, tenemos un espacio de 1 m desde la parte posterior de la antena hasta las puntas del absorbente.
- LISN: La gran mayoría de los ensayos para de equipos eléctricos y electrónicos de consumo requieren de una LISN con una impedancia característica de  $50\ \mu\text{H}$ , pero para tratar de imitar la impedancia propia de una batería y los cables de un vehículo es necesaria una impedancia de  $(5\ \mu\text{H} + 1\ \text{Ohm}) \parallel 50\ \text{Ohm}$ .

Esta LISN es específica de la norma CISPR 25 y su impedancia característica en función de la frecuencia ha de estar comprendida dentro de los siguientes límites:

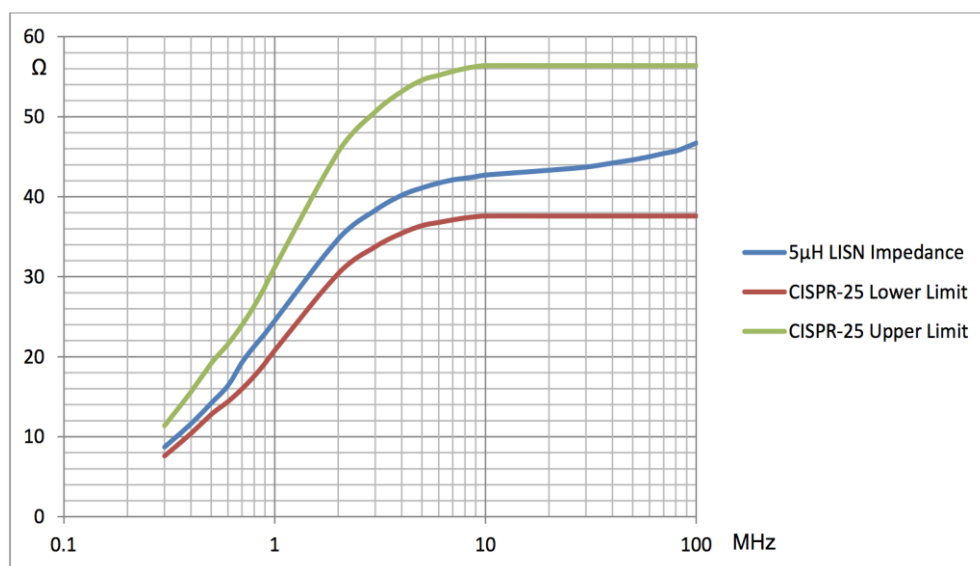


Figura. 4.3 Límites impedancia LISN (fuente: Tekbox TBOH01 Manual)

Por tanto, cualquier red de adaptación de impedancias que tenga una respuesta comprendida entre las líneas roja y verde serán válidas para ser utilizadas en los ensayos.



## 4.3 LÍMITES

### EMISIÓN RADIADA:

La clase que aplica a un componente bajo ensayo será definida entre el fabricante del vehículo y el suministrador del componente.

A continuación, se expone las tablas que reflejan los límites de emisión radiada tanto en banda ancha como en banda estrecha especificados en la CISPR 25:

Class	Levels in dB( $\mu$ V/m)									
	0,15 – 0,3 MHz		0,53 – 2,0 MHz		5,9 – 6,2 MHz		30 – 54 MHz		70 – 108 MHz 144 – 172 MHz 420 – 512 MHz 820 – 960 MHz	
	P	QP	P	QP	P	QP	P	QP	P	QP
1	96	83	83	70	60	47	60	47	49	36
2	86	73	75	62	54	41	54	41	43	30
3	76	63	67	54	48	35	48	35	37	24
4	66	53	59	46	42	29	42	29	31	18
5	56	43	51	38	36	23	36	23	25	12

Figura. 4.3.1. Tabla de límites de banda ancha detector de pico y quasi-pico. (fuente: CISPR 25)

Class	Levels in dB( $\mu$ V/m)				
	0,15 – 0,3 MHz	0,53 – 2,0 MHz	5,9 – 6,2 MHz	30 – 54 MHz	70 – 108 MHz 144 – 172 MHz 420 – 512 MHz 820 – 960 MHz
1	61	50	46	46	36
2	51	42	40	40	30
3	41	34	34	34	24
4	31	26	28	28	18
5	21	18	22	22	12

Figura. 4.3.2. Tabla de límites de banda estrecha detector de pico. (fuente: CISPR 25)

## **4.4 SOLUCIONES OBTENIDAS**

Hemos podido ver que esta norma requiere de equipamiento y de elementos auxiliares de laboratorio muy concretos, que en la mayoría de los casos no son accesibles al fabricante del componente a evaluar puesto que implican una gran inversión de capital.

Por tanto, se ha optado por intentar imitar un ensayo normativo teniendo en cuenta las limitaciones que se tiene y que no podría ser un ensayo acreditado.

Las limitaciones observadas son las siguientes:

### **4.4.1 Cámara anecoica**

La cámara, aun siendo una cámara acreditada para ensayos de compatibilidad electromagnética, no podría serlo para esta norma por que el ancho debería ser mayor, la norma indica que la distancia desde el final de la mesa hasta el inicio de los absorbentes de las paredes debe ser mayor de un metro.

Esto debería ser solucionado si se quisiese acreditar el ensayo, pero para las medidas que se van a hacer en este proyecto se considera que los resultados no se van a ver alterados de forma significativa, sobre todo por el tamaño del EUT que sí que cumpliría esta distancia.

### **4.4.2 Mesa de ensayo**

Para la mesa de ensayo se dispone de una mesa conductora de cobre de las dimensiones necesarias (2000x1000x900 mm). Como se ha mencionado en apartados anteriores esta debería tener conexión a tierra, por lo que se ha optado por la fabricación de unas planchas de acero galvanizado de 0.5mm que cumpla con los requisitos necesarios.



*Figura. 4.4.2. Imagen de la conexión del plano de la mesa con el suelo de la cámara semianecoica.*

Para que el contacto con la superficie conductora de la cámara semianecoica sea correcto es necesario el uso de cinta conductora de cobre. Esta alternativa a la conexión directa a la cámara está contemplada en la norma y es perfectamente válida.

#### **4.4.3 Antenas**

No se dispone de las cuatro antenas indicadas en la norma, pero sí de otras empleadas en ensayos EMC aplicables a equipos eléctricos y electrónicos distintos a los de automoción. Estas antenas son válidas en el rango de frecuencias comprendido entre 30 MHz y 6 GHz, por lo que podrían ser usadas para obtener medidas razonables.

#### **4.4.4 LISN**

Se ha intentado adquirir una LISN de automoción, pero no ha sido posible, en primer lugar, por su alto precio y en segundo, y más limitante, porque su fecha de entrega excedía el periodo de desarrollo del proyecto.

Por todo esto se estudió y se optó por diseñar y fabricar una red de adaptación de impedancias propia.

## 5 PROYECTO ELEGIDO

### 5.1 EXPLICACIÓN DEL PROYECTO:

La tarjeta electrónica está diseñada para ser compatible con el control de un servofreno eléctrico y de un sistema de freno tipo “brake-by-wire”<sup>7</sup>.

En esta tarjeta, la ECU<sup>8</sup> acciona, en función de la ley de control definida por el fabricante del servofreno, un motor BLDC<sup>9</sup> que proporciona asistencia a la frenada realizada por el conductor sobre el pedal de freno. Esta asistencia se define en función del desplazamiento del pedal de freno. Es un sistema pensado principalmente para el freno de servicio.

La electrónica dispone de diferentes interfaces externas como salidas y entradas digitales, salidas y entradas analógicas, interfaces SPI y dos buses CAN. Todas estas interfaces permitirán la conectividad con diferentes tipos de sensores externos a la ECU, así como con otros elementos presentes en el vehículo. Con todo esto se ha realizado el diseño del esquema eléctrico de ambos diseños.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques:

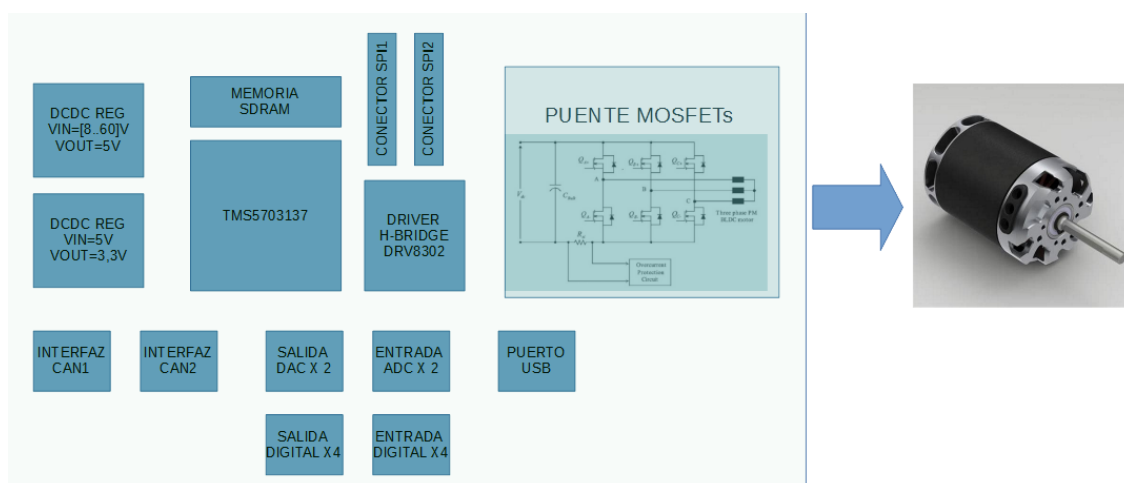


Figura. 5.1.1. Diagrama de bloques de la tarjeta. (fuente: proyecto Sofía Naitec).

<sup>7</sup> “brake-by-wire”: se eliminan sistemas mecánicos para introducir sistemas electrónicos de control en la frenada.

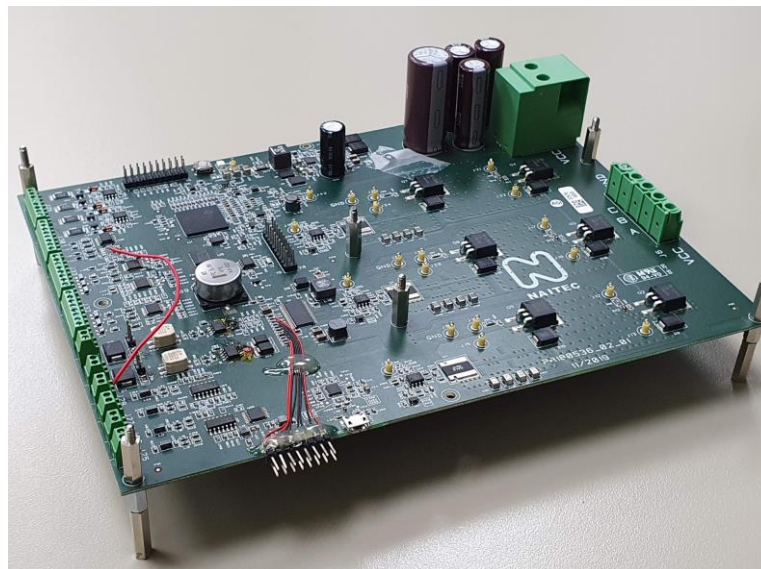
<sup>8</sup> ECU (Engine Control Unit): Unidad de control de motor.

<sup>9</sup> BLDC: motor de corriente continua sin escobillas.



*Figura. 5.1.2. Imagen superior de la tarjeta.*

La tarjeta (dimensiones 270mm x 170mm), alimenta un motor BLDC externo, con un puente H, basado en seis MOSFET sobre tres ramas, capaz de generar de modo continuo 23 amperios a una temperatura ambiente de 85°C. Los picos de corriente generados pueden llegar a 120 amperios para tiempos inferiores a 1.4 segundos a 85°C. Para la estimación de la posición de rotor se realiza una medida de la corriente en cada fase, usando un conjunto de tres resistencias de shunt, para tener un valor de 1mΩ y 9 vatios (95 amperios máximos de corriente continua a 70°C de temperatura ambiente). El factor de ganancia en el conversor corriente-tensión es de 20mV/A.



*Figura. 5.1.3. Imagen con perspectiva de la tarjeta.*

## 5.2 CAD'S Y ESQUEMÁTICOS

A continuación, se indican las distintas partes de la tarjeta, utilizando una imagen de su CAD e incluyendo una breve descripción de cada una de estas partes:

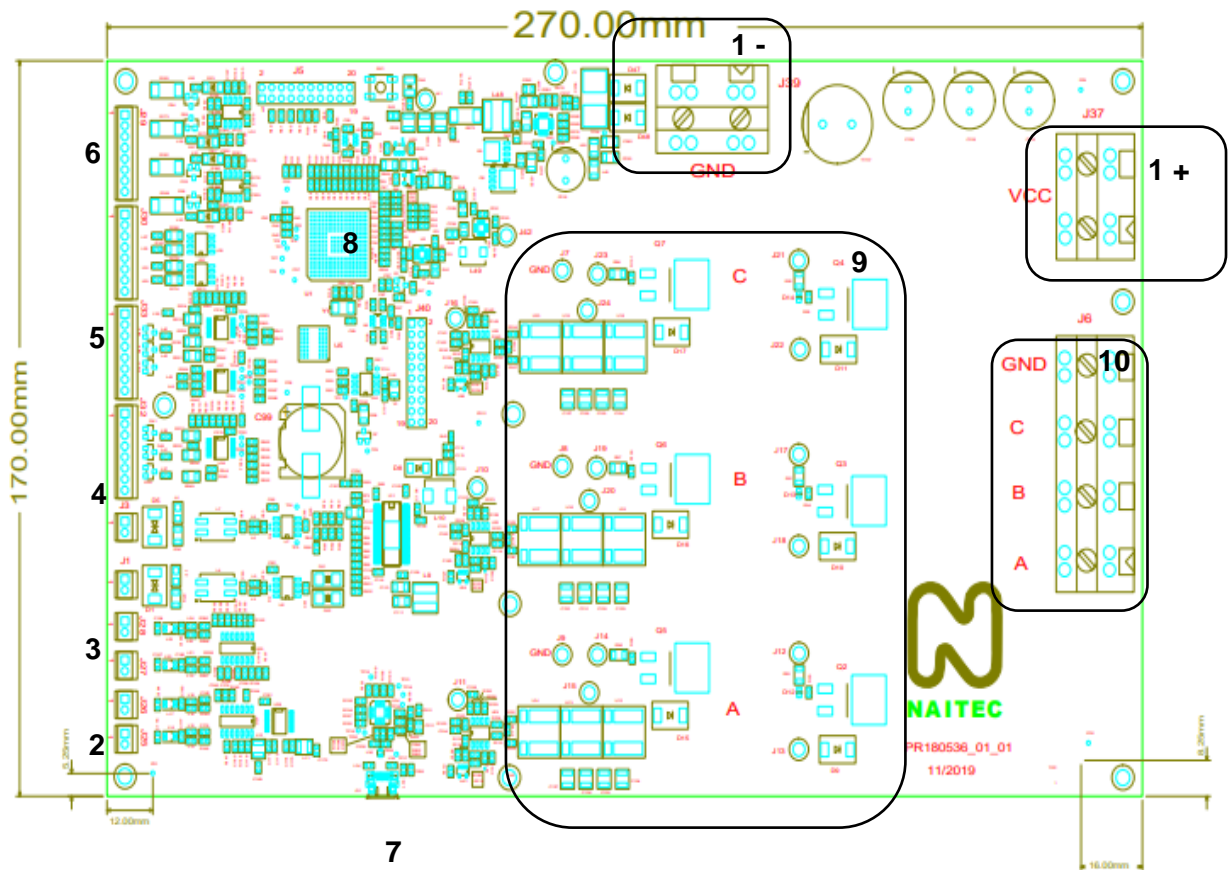


Figura. 5.2 CAD tarjeta Sofia (fuente: Proyecto Sofia Naitec)

1. Entrada de alimentación desde batería, con rango de tensión de entrada desde 8V hasta 60V, y salida 5V con 4 amperios de corriente máxima, protegida frente a ensayos de ráfagas y de onda de choque, con capacidad de soportar pulsos 10/1000  $\mu$ s de 5kW de pico.
2. Dos interfaces CAN,
3. Un puerto con dos salidas analógicas en el rango  $V = [0.5]V$  con  $I_{max} = 5 \text{ mA}$ , asociado a un convertor DAC.
4. Un puerto con dos entradas analógicas en el rango  $V = [0.5]V$ , asociado a un convertor ADC.
5. Un puerto con 4 salidas digitales  $V = [0.5]V$  con  $I_{max} = 200\text{mA}$ .
6. Un puerto con 4 entradas digitales  $V = [0.100]V$ .
7. Un puerto de comunicaciones USB 2.0.
8. El microcontrolador seleccionado es un TMS5703137CGWTQEP de TEXAS INSTRUMENTS, que integra un ARM Cortex-R4F, con unidad de procesamiento en punto flotante, a 180MHz.
9. Puente de mosfet's.
10. Salidas al motor.

## 6 LISN

---

### 6.1 INTRODUCCIÓN

Una LISN (Line Impedance Stabilizing Network) es un filtro de paso-bajo típicamente colocado entre una fuente de alimentación AC o DC y el EUT (equipo bajo prueba) para crear una impedancia conocida y característica del sistema de alimentación del EUT, además de proporcionar un puerto de medición. También aísla las señales de RF no deseadas de la fuente de alimentación. Además, las LISN se pueden utilizar para predecir la emisión conducida para diagnóstico y pruebas de cumplimiento previo. Sus tres principales utilidades son:

#### **A. *Dotar de una impedancia de línea estable***

La función principal de un LISN es proporcionar una impedancia precisa a la entrada de energía del EUT, con el fin de obtener mediciones repetibles del ruido del EUT presente en el puerto de medición de la LISN. Esto es importante porque la impedancia de la fuente de alimentación y la impedancia del EUT operan efectivamente como un divisor de voltaje. La impedancia de la fuente de alimentación varía, dependiendo de la geometría del cableado de alimentación detrás de ella. La inductancia anticipada de la línea eléctrica para la instalación prevista del EUT también juega un papel en la identificación del tipo correcto de LISN necesario para la prueba. Por ejemplo, una conexión en un edificio a menudo utilizará un inductor de 50  $\mu\text{H}$ , mientras que en los estándares de medición de automóviles se utiliza un inductor de 5  $\mu\text{H}$  para emular una longitud de cable típica más corta.

#### **C. *Proporcionar de un aislamiento del ruido de la fuente de alimentación***

Otra función importante de un LISN es evitar que el ruido de alta frecuencia de la fuente de alimentación se acople en el sistema. Una LISN funciona como un filtro de paso bajo, que proporciona alta impedancia al ruido de RF exterior mientras permite que la energía de baja frecuencia fluya a través del EUT.

#### **D. *Otorgar una conexión segura del equipo de medición***

Normalmente, se utiliza un analizador de espectro o un receptor EMI para tomar las medidas durante una prueba de EMC. El puerto de entrada de dicho equipo es muy sensible y propenso a sufrir daños si se sobrecarga. Un LISN proporciona un puerto de medición con, generalmente, una impedancia de salida de 50  $\Omega$ . Esta impedancia estará adaptada con respecto a la impedancia de entrada del receptor de EMI o analizador de espectros, que también ha de ser de 50  $\Omega$ , asegurando la máxima transferencia de potencia durante la medida. La impedancia estabilizada, la función de filtro de paso bajo incorporada y las propiedades de rechazo de CC del puerto de medición LISN facilitan el acoplamiento de la señal de ruido de alta frecuencia a la entrada del equipo de medición.



## 6.2 BOBINA

El elemento más importante de esta LISN es la bobina, para el correcto funcionamiento de la red de adaptación de impedancias es importante intentar que esta no sature a ningún rango de frecuencias, por lo que es indispensable que esta sea de núcleo de aire. En el mercado es algo complejo de encontrar y los plazos de entrega son bastante elevados, por lo que se ha decidido diseñarlas y construirlas.

### 6.2.1 Proceso de diseño

Existen multitud de páginas web que calculan el valor de inductancia según qué tipo de cable, diámetro, número de vueltas y dimensión de la bobina. La dimensión de la bobina viene condicionada por las herramientas de fabricación de las que se disponía, en correlación con el tamaño interno de la caja en las que se iban a introducir los componentes de la LISN. A partir de ahí, se ajustan el resto de los parámetros para conseguir la inductancia deseada:

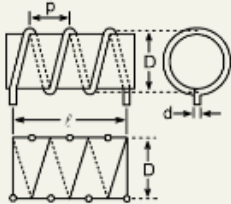

round wire coil with dimensions and current-sheet approximation <sup>1</sup>		
mean diameter of the air core coil, measured from conductor centre to conductor centre (include the wire insulation thickness, if any)	$D$	<input type="text" value="25"/> mm
number of turns	$N$	<input type="text" value="17"/>
length of the coil, measured from the connecting wires centre to centre	$\ell$	<input type="text" value="21"/> mm
wire or tubing diameter	$d$	<input type="text" value="1.2"/> mm
plating material		<input type="text" value="Cu, annealed"/> 

Figura. 6.2.1.1 Valores de diseño de la bobina. (fuente: <https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1> ).

Algo a tener en cuenta en una bobina y en general en cualquier elemento es que, aunque su principal valor sea su inductancia, existen comportamientos resistivos y capacitivos parásitos que variarán con la frecuencia. Veremos esto en apartados posteriores.



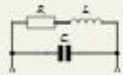
lumped equivalent circuit		
frequency-independent series inductance from the current-sheet coil geometrical formula, corrected for field non-uniformity and round wire <sup>1,3-6</sup>	$L_s$	$\overline{5.512}$ $\mu\text{H}$
series AC resistance of the round wire coil at the design frequency	$R_s$	$\overline{0.461}$ $\Omega$
parallel stray capacitance at the design frequency, from Corum's sheath helix waveguide formula <sup>7</sup>	$C_p$	$\overline{15.1}$ $\text{pF}$

Figura. 6.2.1.2 Valores de inductancia, capacidad y resistencia. (fuente:<https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1> ).

$\lambda/4$ parallel self-resonant frequency of $n = 0$ sheath helix mode <sup>7,8</sup>	$f_{\text{res}}$	$\overline{69.472}$ $\text{MHz}$
--	------------------	-------------------------------------

Figura. 6.2.1.3 Frecuencia de resonancia. (fuente:<https://hamwaves.com/inductance/en/index.html#ref-Knight1> ).

Con estos valores es posible hacer una simulación para determinar el comportamiento de la bobina. En apartados posteriores, cuando se mida el comportamiento de la bobina será útil tener el valor de la frecuencia de resonancia <sup>10</sup> para comparar.

<sup>10</sup> Frecuencia de resonancia: frecuencia a la cual el valor de inductancia y capacidad son iguales ( $Z_L = Z_C$ ).

### 6.2.2 Simulación

Se han tenido en cuenta los valores de resistencia y capacidad parásitas para el proceso de simulación. En este primer caso se ha utilizado el software **RF99<sup>11</sup>**. Dibujamos el circuito equivalente de la bobina con los valores obtenidos en el proceso de diseño.

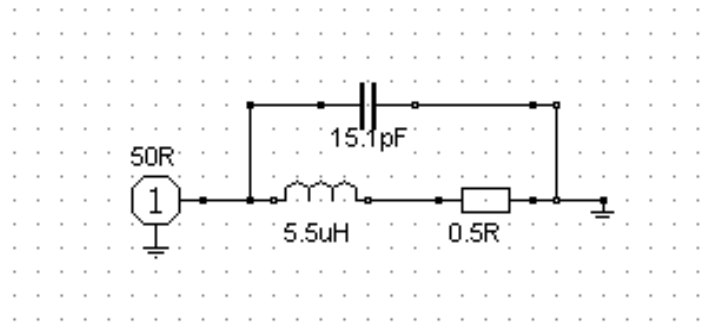


Figura. 6.2.2.1 Circuito equivalente de la bobina una entrada.

Con el circuito ya montado se obtiene el parámetro S11, que indica cual es el valor de coeficiente de reflexión, es decir, cuanta señal de entrada es reflejada hacia la propia entrada por no existir una adaptación de impedancias total.

Simulando en un rango de frecuencias entre 150 KHz y 500 MHz se obtiene las siguientes señales:

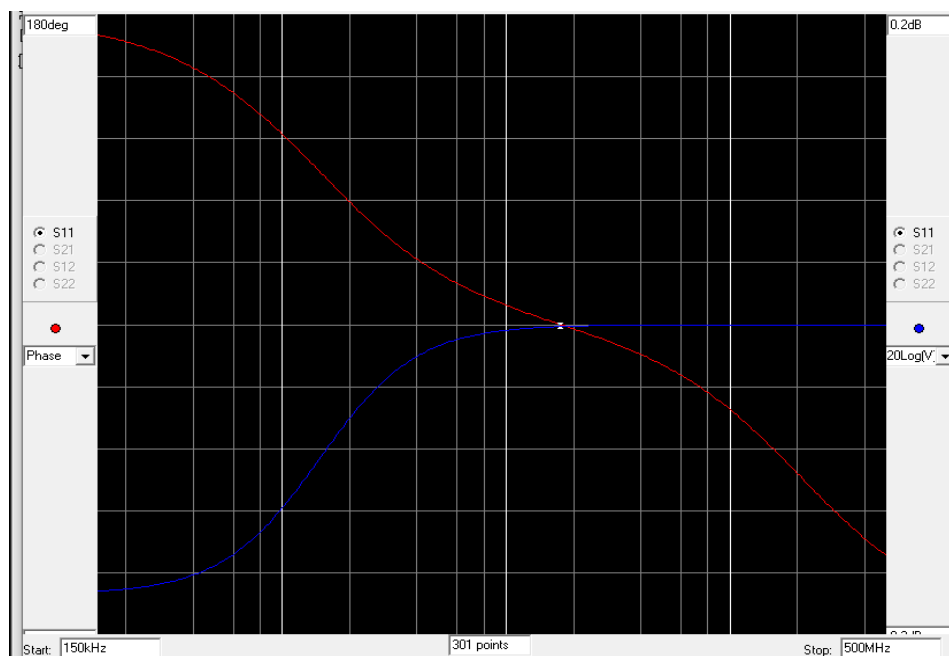


Figura. 6.2.2.2 Respuesta del parámetro S11 con una entrada.

<sup>11</sup> Enlace de descarga: (<https://www.electroschematics.com/rfsim99-download/>).

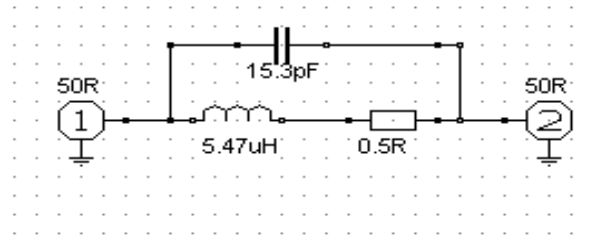


Figura. 6.2.2.3 Circuito equivalente de la bobina dos entradas.

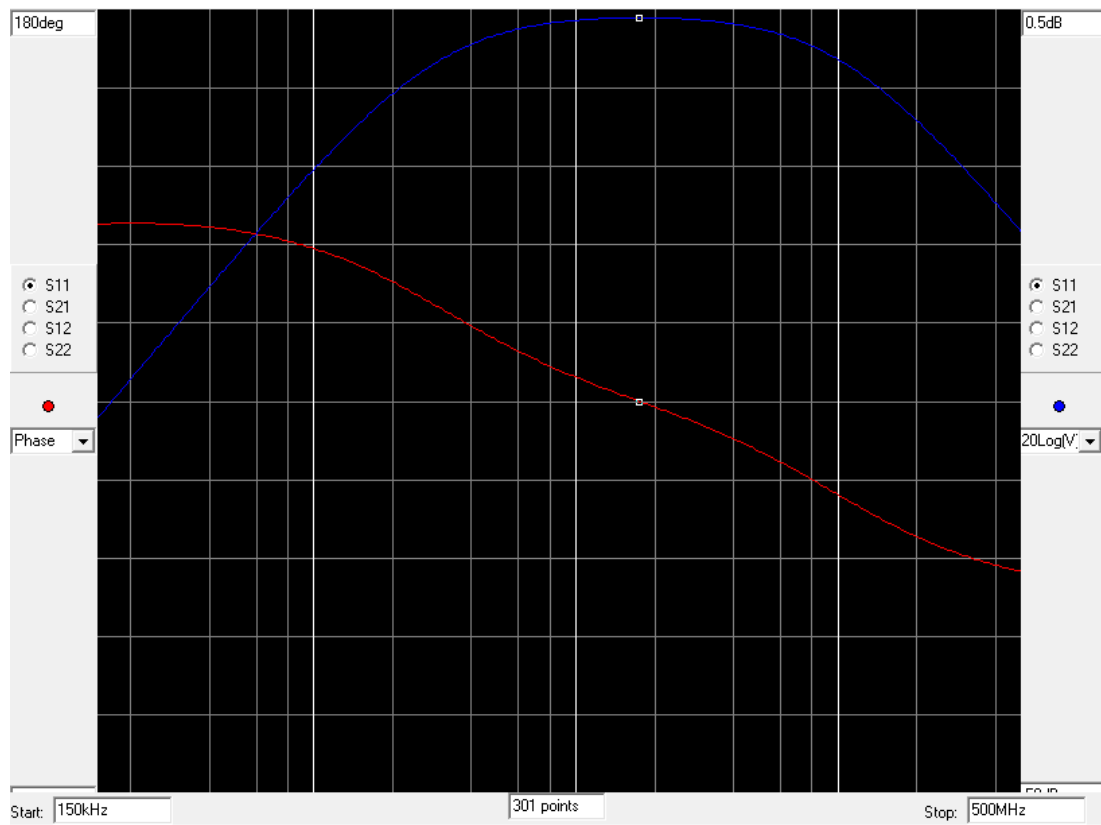
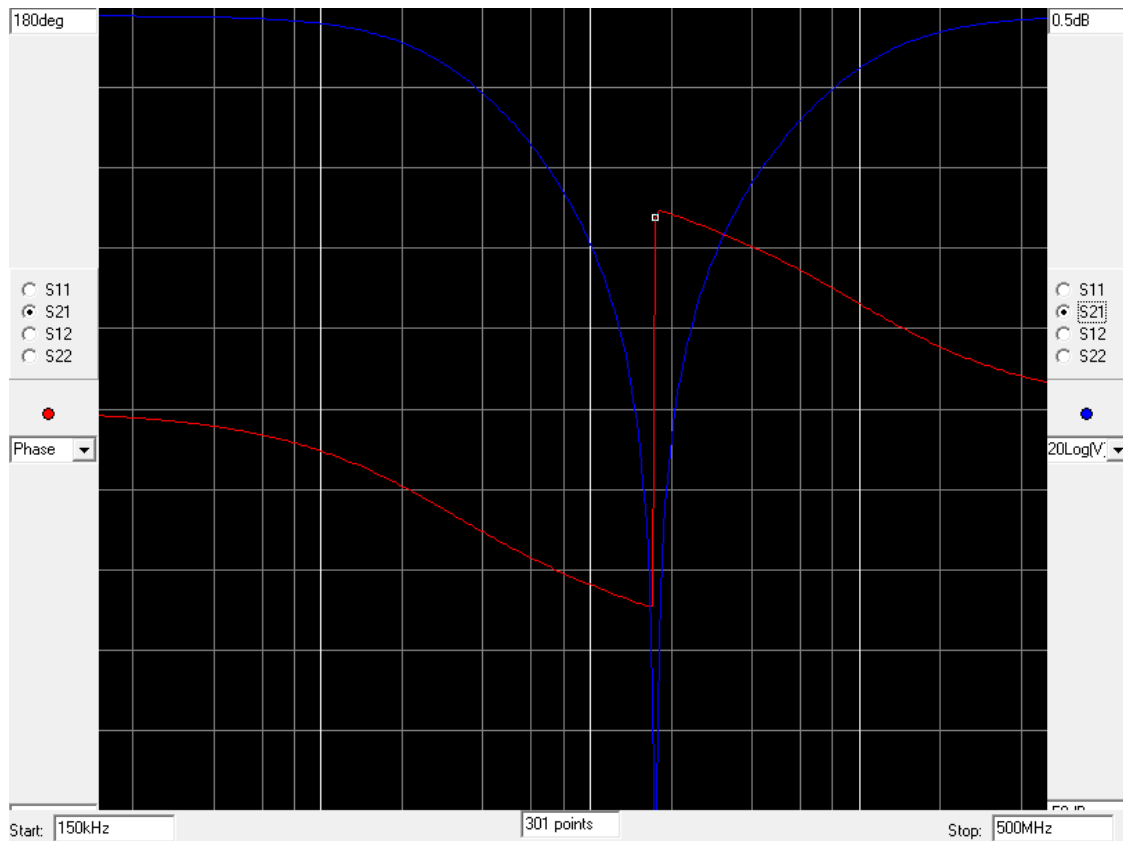


Figura. 6.2.2.4 Respuesta del parámetro S11 con dos entradas.



*Figura. 6.2.2.5 Respuesta del parámetro S21 con dos entradas*

Cuando hablamos de S21 nos referimos al parámetro que mide la potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la enviada por el puerto 1. A este parámetro se le conoce como “coeficiente de transmisión directa”. Si fuese el orden de los puertos al revés, se le llamaría “coeficiente de transmisión inversa”.

Estas figuras, que son el resultado de las simulaciones de los parámetros S11 y S21 de las bobinas, nos serán de ayuda cuando se hayan construido las mismas. La idea es efectuar la medida directa de estos parámetros en las bobinas reales, para finalmente compararlas y así poder indicar si la construcción ha sido correcta.

### 6.2.3 Construcción

El proceso de construcción es totalmente manual, para el cual únicamente se ha necesitado un tubo de PVC de tamaño igual al escogido para el diámetro interno de la bobina.

Se fija un lado del cable esmaltado de cobre al tubo y el otro extremo a un tornillo de banco y se le da tantas vueltas como sea necesario.

Es importante tener en cuenta también, que es determinante la separación entre las vueltas, y por tanto el tamaño final de la bobina, para el valor final de impedancia.



*Figura. 6.2.3.1. Proceso de fabricación.*



*Figura. 6.2.3.2. Acabado final.*

Algo a tener en cuenta a la hora de fabricar una bobina es que el hilo de cobre debe estar esmaltado para que no haya contacto eléctrico entre las vueltas, por tanto, es importante no dañar este recubrimiento para no afectar al comportamiento. No es así en las patillas, donde si se quiere tanto medir como soldar será necesario eliminar esta capa de forma parcial, hasta donde se necesite. El proceso se facilita si se calienta la zona y se utiliza una herramienta afilada.

#### 6.2.4 Medida

En este apartado se busca conocer el valor de inductancia final, para comprobar que el diseño ha sido correcto y por tanto el comportamiento final de la LISN. Para ello se utiliza un medidor LCR<sup>12</sup>, en este caso de la marca Agilent y modelo 4263B.

##### Bobina A:



Figura. 6.2.4.1 Medida de la bobina A en LCR.

##### Bobina B:

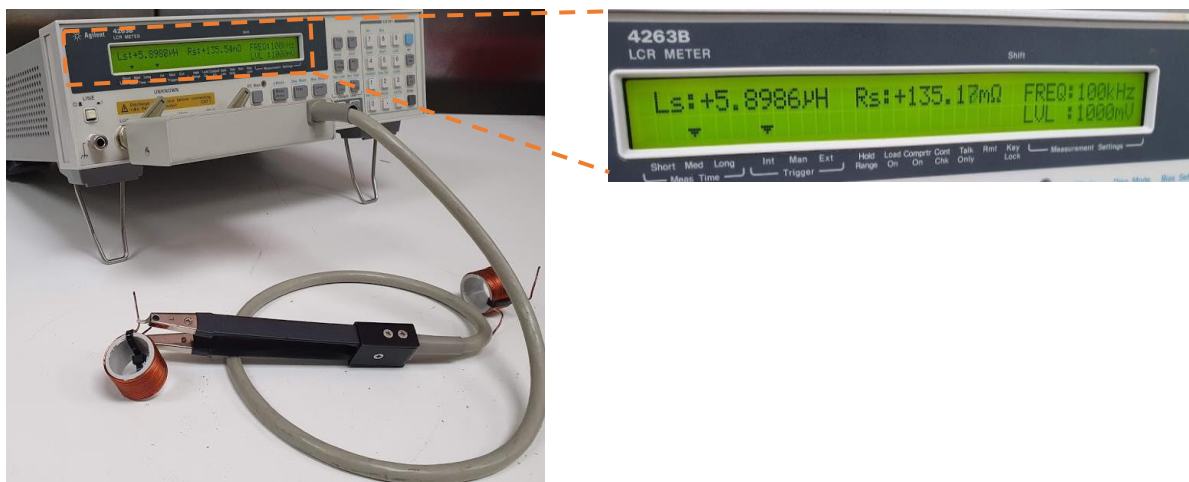


Figura. 6.2.4.2 Medida de la bobina B en LCR.

<sup>12</sup> Medidor LCR: Instrumento usado para medir la inductancia, capacitancia y resistencia de un componente

Para ver el comportamiento de la bobina según su frecuencia es necesario utilizar un Analizador vectorial de redes (VNA<sup>13</sup>). En este caso un **HP hewlett packard 4195**, un dispositivo antiguo que aporta el inconveniente de no poder extraer la información de la medida de ninguna forma por lo que se ha optado por hacer fotografías de las medidas de la mejor forma posible.

Se han llevado a cabo dos tipos de medidas diferentes. En primer lugar, se hace una medida de la impedancia de la bobina utilizando un adaptador que permite conocer directamente dicho parámetro en función de la frecuencia, en módulo y fase, utilizando para ello un solo puerto del VNA. En segundo lugar, se hace una medida de los parámetros S utilizando dos adaptadores Tx/Rx (transmisión y recepción), para poder llevar a cabo una medida de dos puertos.

- Medida de impedancia:

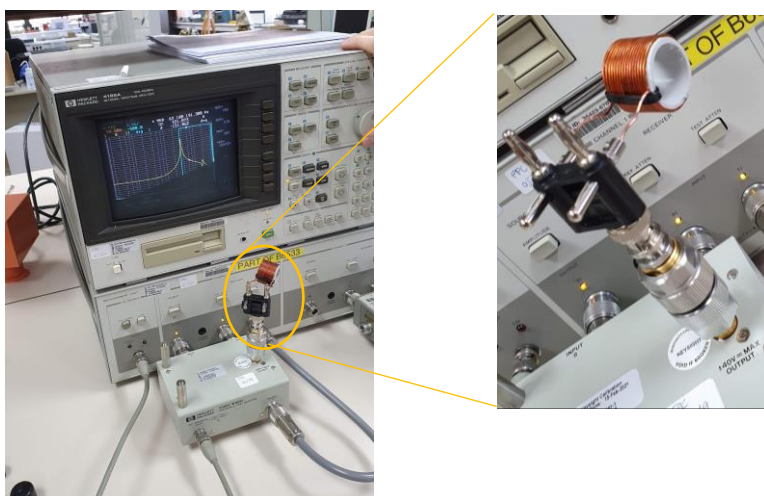


Figura. 6.2.4.3 Medida VNA Bobina.

Con esta disposición es posible obtener la carta de Smith, la cual nos ayudará a ver el comportamiento de la impedancia de la bobina conforme va aumentando la frecuencia:



Figura. 6.2.4.4 Carta Smith bobina.

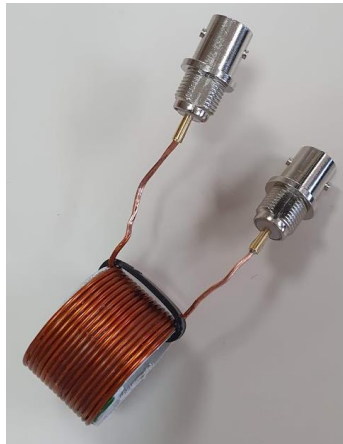
<sup>13</sup> **VNA (Vector Network Analyzer):** Instrumento capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión (Parámetros-S).



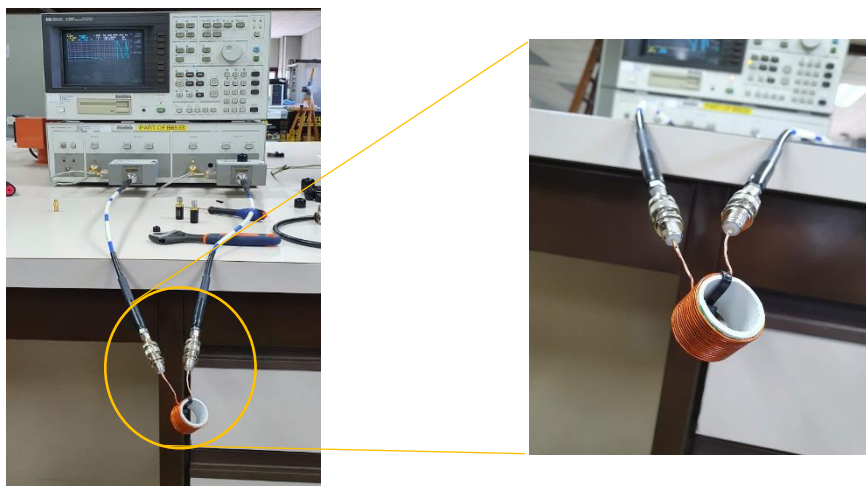
Vemos como mantiene su comportamiento inductivo y su valor más o menos constante hasta los 10MHz aproximadamente, después la señal varía drásticamente llegando a tener un comportamiento capacitivo y variando su valor de forma rápida con la frecuencia.

- Dos puertos al VNA:

Para poder llevar a cabo una medida sobre dos puertos se necesitan dos módulos de Tx/Rx a los cuales se les conecta un cable coaxial. Ha sido necesario el uso de dos BNC para conectar la bobina a estos cables. Hay que tener en cuenta que estos conectores van soldados con estaño y que esto puede afectar a su comportamiento a altas frecuencias ya que el estaño es peor conductor que el cobre.



*Figura. 6.2.4.5 Bobina con BNC soldados.*



*Figura. 6.2.4.6 Set up de la medida de la bobina con 2 puertos al VNA.*



Los resultados obtenidos con en VNA los obtenemos sacando una imagen de la pantalla y es resultado es el siguiente:

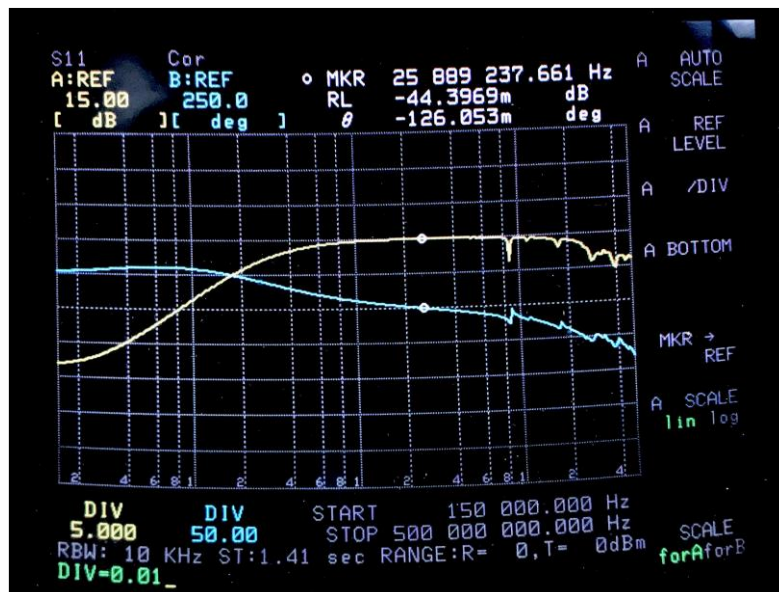


Figura. 6.2.4.7 Módulo y fase de s11 escala lineal



Figura. 6.2.4.8. Módulo y fase de s21 escala log

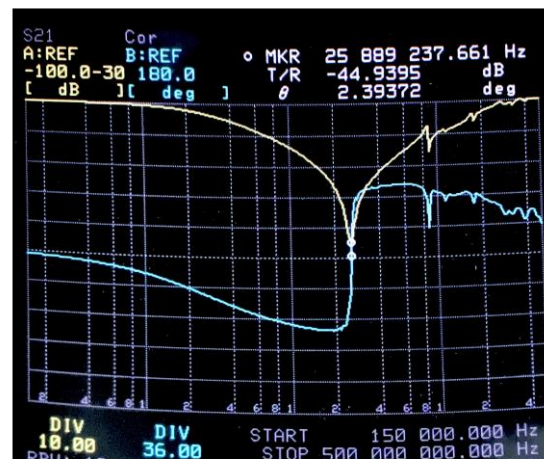


Figura. 6.2.4.9 Módulo y fase de s21 escala lineal

Se puede observar como las respuestas obtenidas con el analizador vectorial de redes es la esperada, comparando con el apartado “6.2.2. Simulación” y las correspondientes figuras 6.2.2.4 y 6.2.2.5. Puede verse como alrededor de 30MHz es donde se produce la resonancia (más apreciable en escala lineal “figura 6.2.4.9”).



### 6.3.2 Construcción

La lista de componentes necesarios y su procedencia es la siguiente:

#### Lista de componentes LISN

N.º	Componente	Origen	Cantidad
1	Carcasa de Aleación de Aluminio Presofundido, 110 x 60 x 54mm, Gris 1465303 RS PRO G0479	RS	2
2	Borne de prueba Hembra, 16A, 50V dc, Contacto Níquel, Rojo	RS	2
3	Borne de prueba Hembra, 16A, 50V dc, Contacto Níquel, Negro	RS	2
4	Conector BNC TE Connectivity 5-1634523-1, Hembra, Recta, Impedancia 50Ω	RS	2
5	Condensador de poliéster PET Epcos, 100nF, ±10%, 305V ac	RS	2
6	Resistencia de precisión de 1KΩ	Laboratorio	2
7	Condensador de poliester de 1uF	Laboratorio	2
8	Bobina de 5uH	Fabricada	2

*Figura. 6.3.2.1 Lista de los componentes de la LISN.*

- Caja:

Todos los componentes van a ir recogidos en una caja de aluminio conductora por todas sus caras ya que esta deberá tener contacto con el plano de tierra.

El material del que se compone es fácil de mecanizar y es necesario que tenga hendiduras para los conectores tanto tipo banana como BNC.



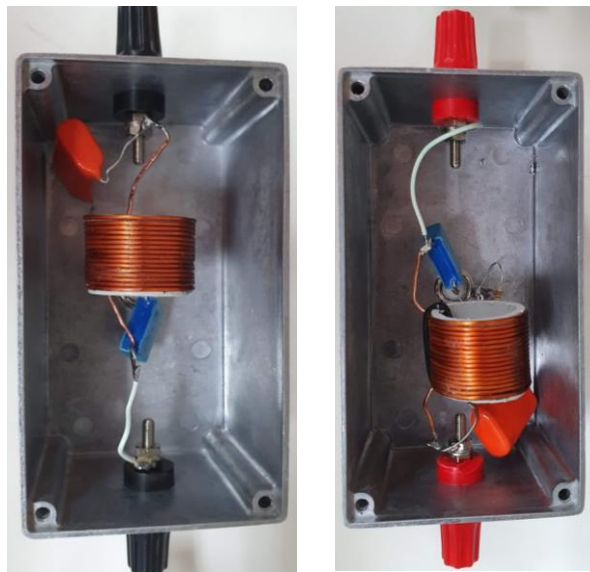
*Figura. 6.3.2.2 Imágenes del mecanizado de la caja.*

Una vez terminado el mecanizado se posicionan los conectores en su posición correcta para facilitar la colocación del resto de componentes.



*Figura. 6.3.2.3. Imagen de la caja con los conectores.*

En la colocación de los elementos es importante prestar atención a la situación de cada elemento, es decir, que no existan contactos no deseados de forma accidental. También conviene utilizar el mínimo cable posible para minimizar impedancias parásitas de cualquier tipo.



*Figura. 6.3.2.4. Imagen del interior de la LISN*

### 6.3.3 Simulación

Se repite el mismo procedimiento que con la bobina, por tanto, se procede a la simulación de todos los componentes de la LISN.

Se completa el circuito de la norma con los parámetros de nuestra bobina, tanto la parte inductiva, como los parásitos correspondientes (capacitivos y resistivos).

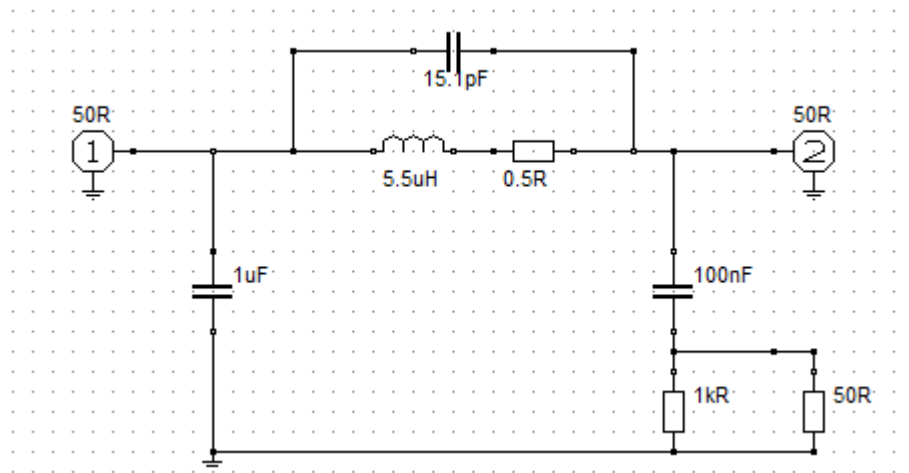


Figura. 6.3.3.1. Circuito de simulación de la LISN.

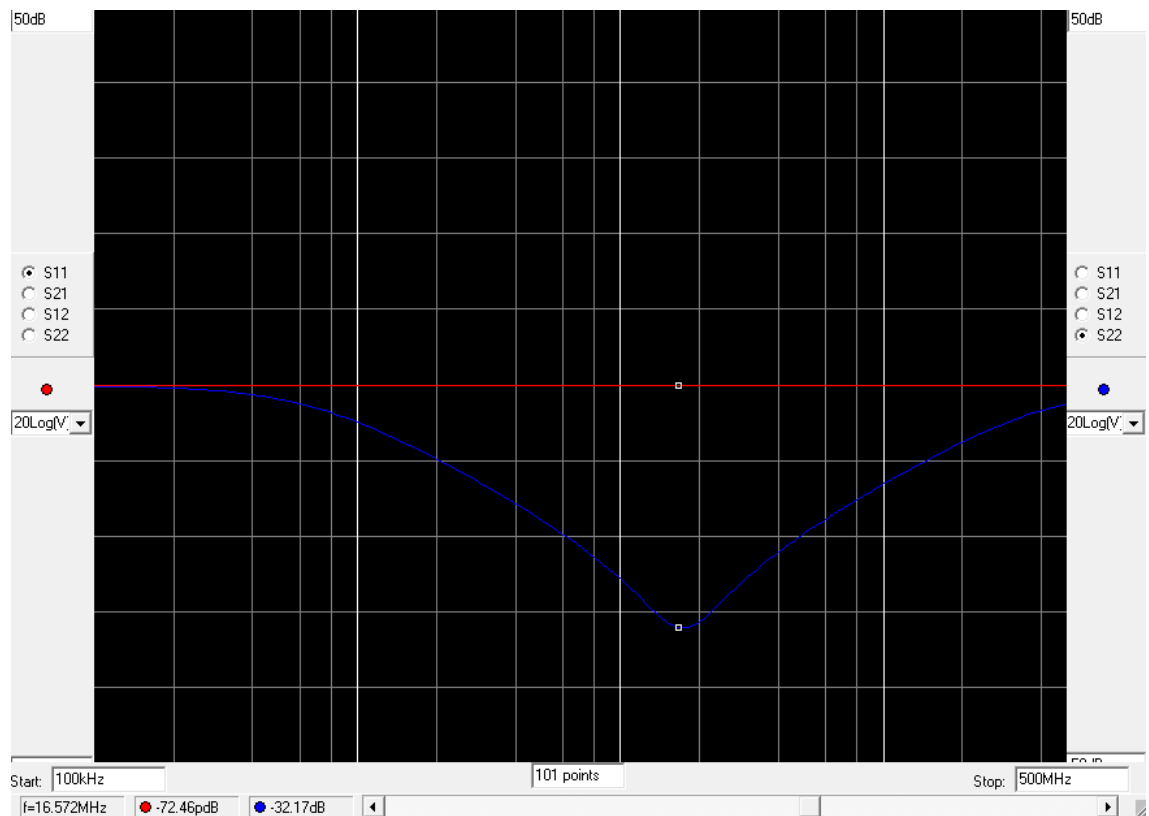


Figura. 6.3.3.2. Módulo de S11 y S22 del circuito.



### 6.3.4 Medida

Para esta asegurar la repetibilidad de las medidas se ha tenido especial cuidado a la hora de montar el set up:

- En primer lugar, se ha puesto un plano conductor unido a la tierra del VNA (1).
- Para la conexión de los puertos de las LISN se ha creado un útil que consta de una placa de acero galvanizado doblada a 90° (2) en la cual se ha hecho un agujero para colocar los conectores. Esta asegura un buen contacto a tierra con la ayuda de cinta conductora (3).
- El cable coaxial tiene una conexión BNC y la LISN de tipo banana por lo que se ha creado un adaptador BNC-Banana (4) para asegurar tener una buena conexión.
- Uso de una impedancia de 50  $\Omega$  (5) calibrada por ENAC<sup>14</sup>.
- Por último, asegurar un buen contacto de la caja de la LISN con el plano de tierra y del terminal de batería (6).

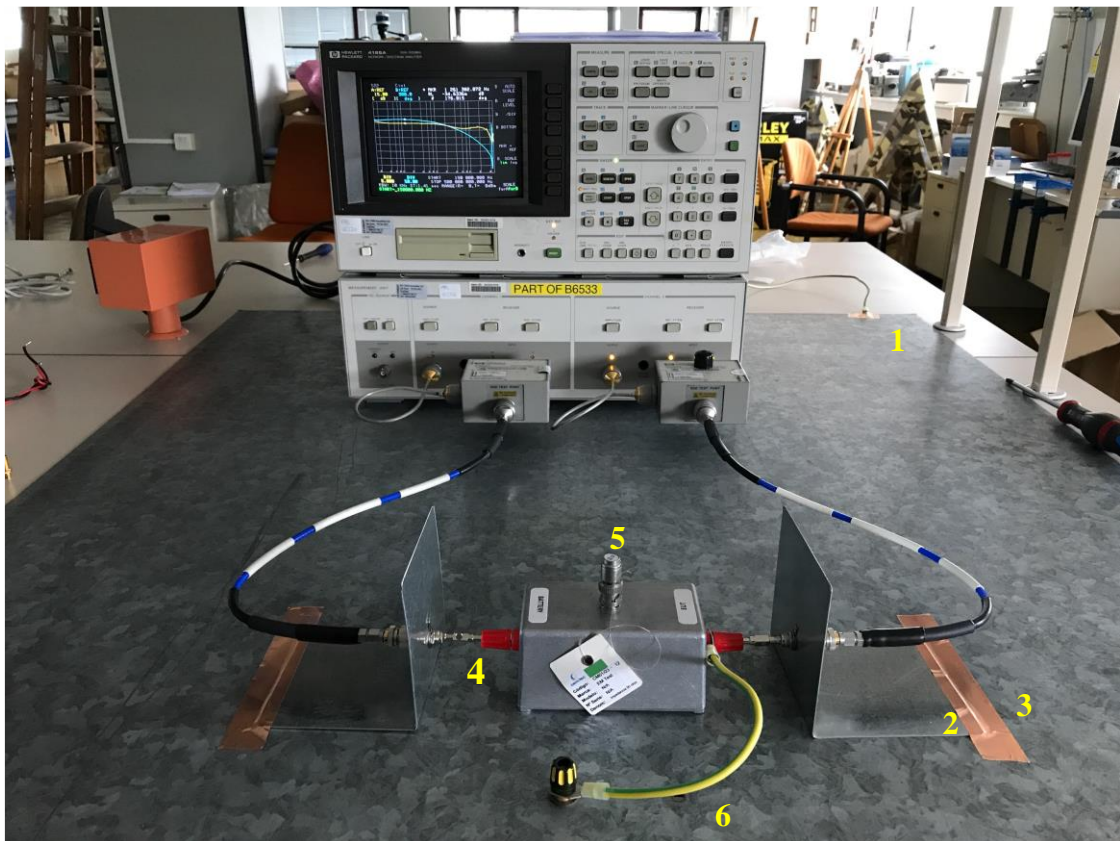


Figura. 6.3.4.1. Set up del ensayo con indicadores, LISN positivo.

<sup>14</sup> ENAC: Entidad Nacional de Acreditación.

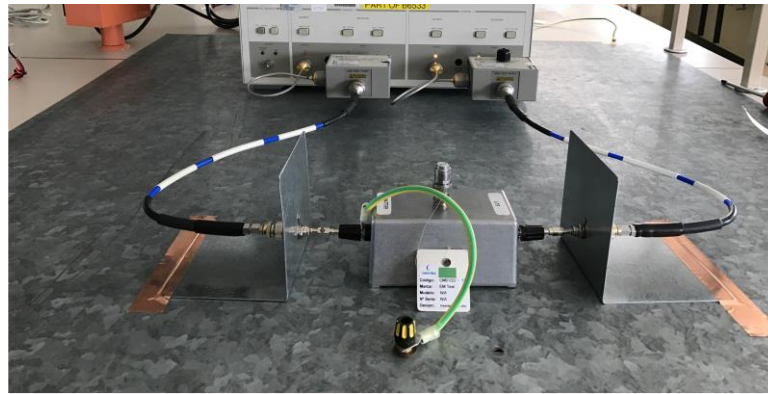


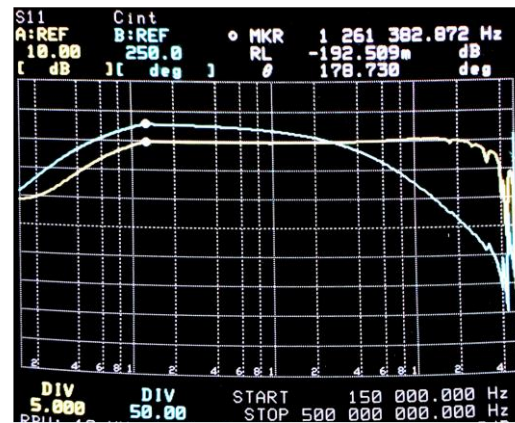
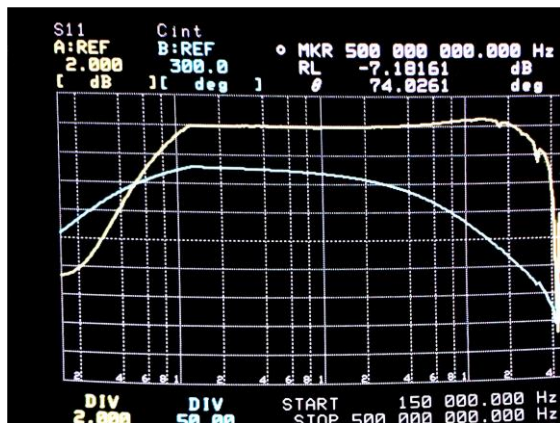
Figura. 6.3.4.2. Set up del ensayo LISN negativo.

Tanto la referente al borne positivo, como la del negativo (roja y negra respectivamente) deberán ser iguales y por tanto las respuestas casi idénticas:

### LISN positivo

### LISN negativo

S11:



S22:

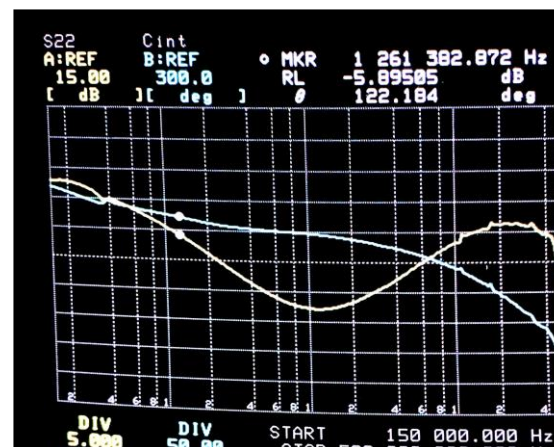
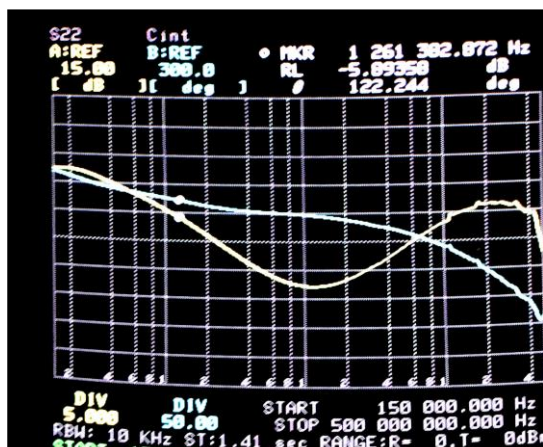
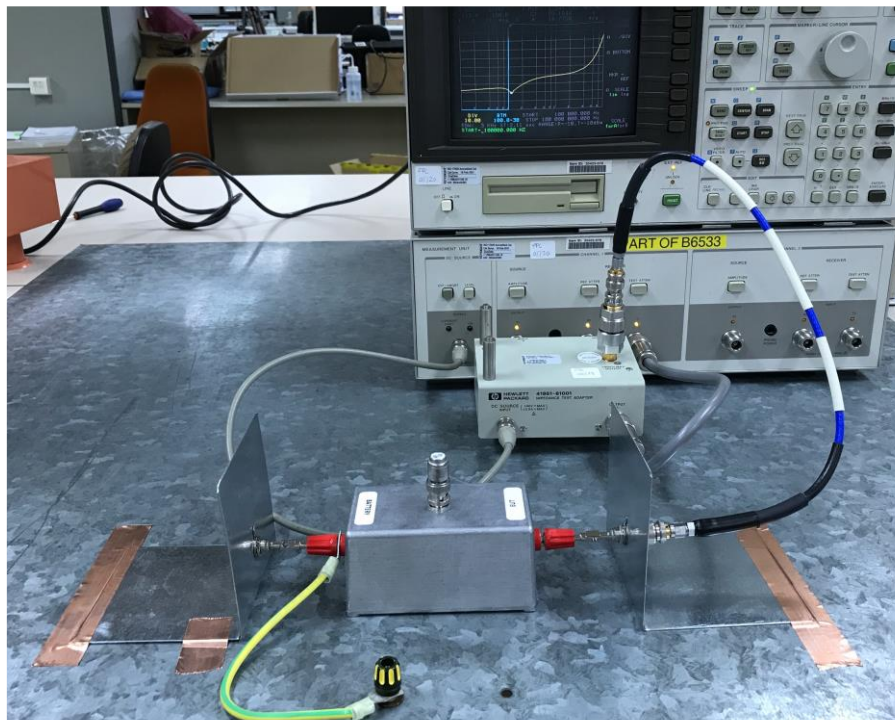


Figura. 6.3.4.3. Tabla respuesta del módulo y fase parámetros S11 y S22 VNA.



Puede verse que comparando con la *Figura 6.3.3.2* el comportamiento en la zona media de frecuencias sí que es el esperado, pero tanto a bajas como altas frecuencias se ve que es un comportamiento muy distinto a lo esperado por la simulación. Pero el parámetro más importante que deben cumplir estas LISN es su impedancia.

Para la medida de impedancia se cambia la distribución del ensayo y se pone el puerto de medida de impedancia del VNA conectada al puerto correspondiente al EUT y el otro puerto a tierra (plano de tierra, cable amarillo y verde).



*Figura. 6.3.4.4 Set up medida de impedancia de la LISN positivo.*



*Figura. 6.3.4.5. Graficas módulo y fase de impedancia en LISN positivo.*

En la figura del medio puede verse una perturbación en la medida producida por un mal contacto de la superficie de la LISN con el plano de tierra. Se demuestra con esto la importancia de la preparación del ensayo y como puede afectar a la medida y a la repetibilidad.



Se repite la medida con la otra LISN y se observan respuestas casi idénticas:

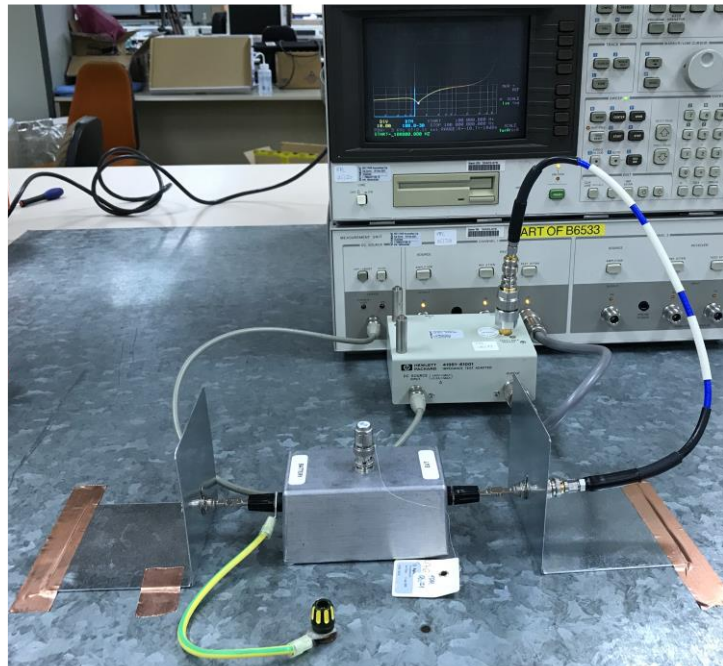


Figura. 6.3.4.6 Set up medida de impedancia de la LISN negativo.

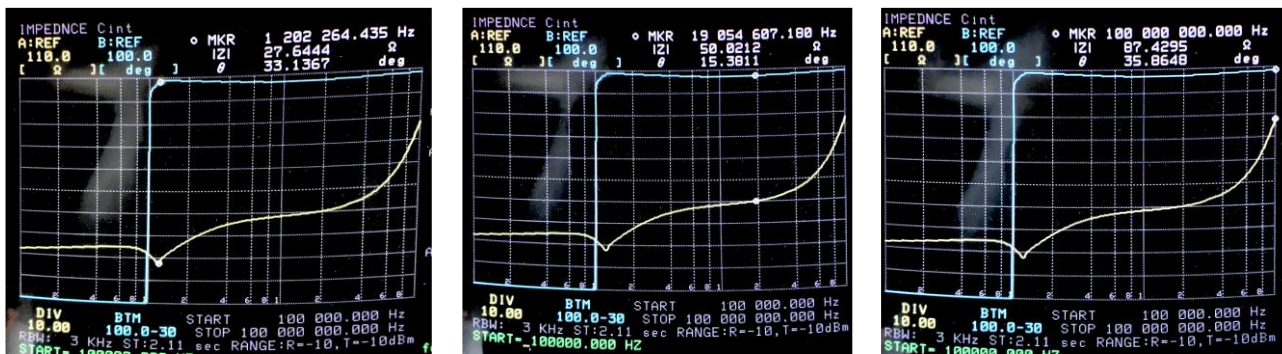


Figura. 6.3.4.5. Graficas módulo y fase de impedancia en LISN negativo.

## 6.4 COMPROBACIÓN

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado "4. CISPR 25" existe una gráfica proporcionada por la norma que indica los límites de impedancia que debe respetar una red de adaptación de impedancias. Por ello se ha decidido extraer los datos a una tabla Excel y representar en una gráfica tanto los límites de la norma como los valores de impedancia de nuestras LISN.

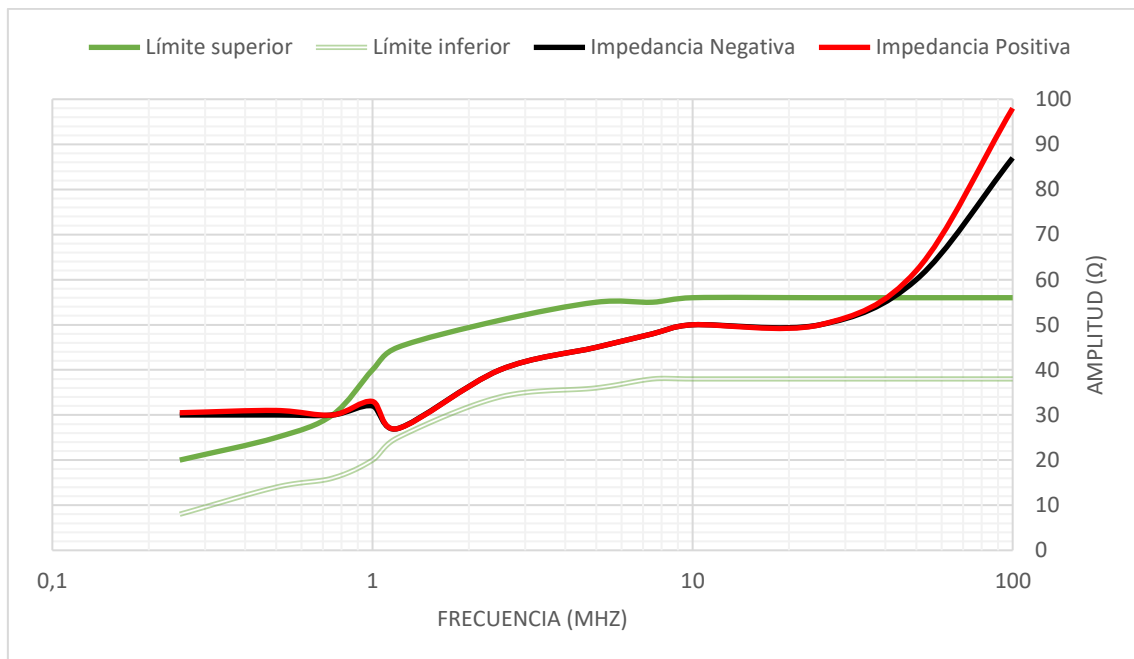


Figura. 6.4. Gráfico Excel de límites de impedancia de las LISN.

Como era de esperar la respuesta de la LISN no es perfecta, hay que tener en cuenta todas las limitaciones que se han tenido y era lógico esperar que con un precio mucho menor (alrededor de 90 veces menor a su valor comercial) no iba a cumplir los requisitos de la norma.

Aun así, la respuesta no es del todo mala e incluso es perfectamente utilizable en rangos de frecuencia intermedios. Por lo tanto, se demuestra que las LISN fabricadas son óptimas para llevar a cabo los ensayos de emisión radiada que se van a explicar en el siguiente apartado, al menos de manera aproximada.

## 7 ENSAYO DE EMISIÓN RADIADA.

### 7.1 INTRODUCCIÓN DEL ENSAYO

En este apartado se realizará el ensayo de emisión radiada del dispositivo mencionado en el apartado “5 Proyecto elegido”, teniendo en cuenta todas las limitaciones mencionadas anteriormente.

Durante el ensayo se han efectuado diversas medidas con el fin de recoger todos los modos de funcionamiento del dispositivo y ver si en todos ellos se cumplen los requisitos de la CISPR 25.

Se quiere ver cual es la diferencia que existe entre utilizar o no la red de adaptación de impedancias. Se tiene por tanto la siguiente batería de ensayos:

Sin LISN	Motor libre
	Motor con carga
	Stand by
Con LISN	Motor libre
	Motor con carga
	Stand by

Figura. 7.1. Batería de ensayos emisión radiada CISPR 25

### 7.2 RESULTADOS OBTENIDOS

#### 7.2.1 Ensayo sin LISN

En la siguiente figura puede verse la disposición de los elementos para el ensayo en la que la placa bajo ensayo está a la derecha, el motor y la fuente a la izquierda y como unión de las dos el mazo de cables de un metro de longitud enfrentado a la antena. Aunque para el ensayo se sacó la fuente de la cámara para evitar cualquier tipo de interferencia ajena al ensayo, aunque sea una fuente de laboratorio y su emisión sea muy baja.



Figura. 7.2.1. Set up ensayo sin LISN

7.2.1.1 sin LISN, alimentación fuera y motor libre

-Medidas en valor de Pico y de average.

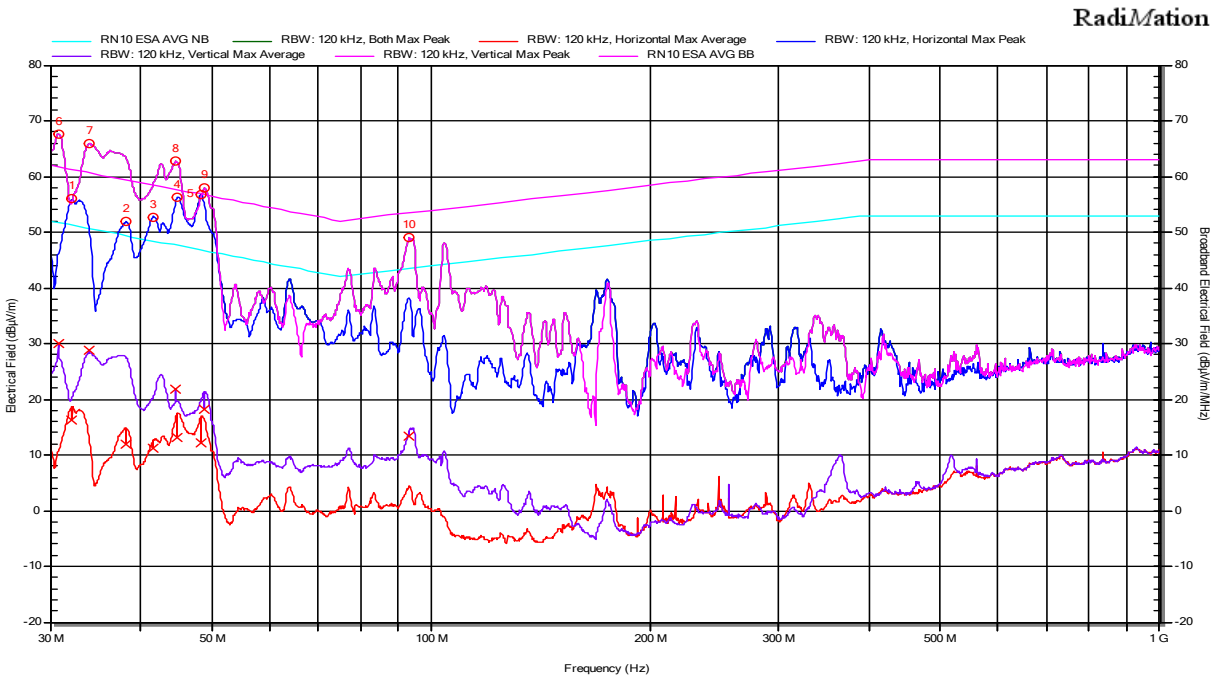


Figura. 7.2.1.1.1 Gráfica sin LISN y motor libre.

-Frecuencias críticas en valor de pico.

Peak Number	Frequency	Peak	Average	Status	Polarization
1	32,16 MHz	55,9 dBμV/m	17,3 dBμV/m	Pass	Horizontal
2	38,13 MHz	51,9 dBμV/m	11,4 dBμV/m	Pass	Horizontal
3	41,61 MHz	52,8 dBμV/m	10,8 dBμV/m	Pass	Horizontal
4	44,91 MHz	56,3 dBμV/m	11,2 dBμV/m	Pass	Horizontal
5	48,3 MHz	56,8 dBμV/m	11,1 dBμV/m	Pass	Horizontal
6	30,78 MHz	67,7 dBμV/m	30,1 dBμV/m	Pass	Vertical
7	33,99 MHz	65,8 dBμV/m	29,1 dBμV/m	Pass	Vertical
8	44,67 MHz	62,7 dBμV/m	20,9 dBμV/m	Pass	Vertical
9	48,87 MHz	57,8 dBμV/m	28,8 dBμV/m	Pass	Vertical
10	93,3 MHz	48,9 dBμV/m	13,4 dBμV/m	Pass	Vertical

Figura. 7.2.1.1.2 Tabla Cuasi-pico sin Lisn y motor libre

Se observa unos ligeros picos en la zona de bajas frecuencias, pero una vez hecha la medida de cuasi pico se observa que está por debajo del límite.

7.2.1.2 sin LISN, alimentación fuera y motor con carga

-Medidas en valor de pico.

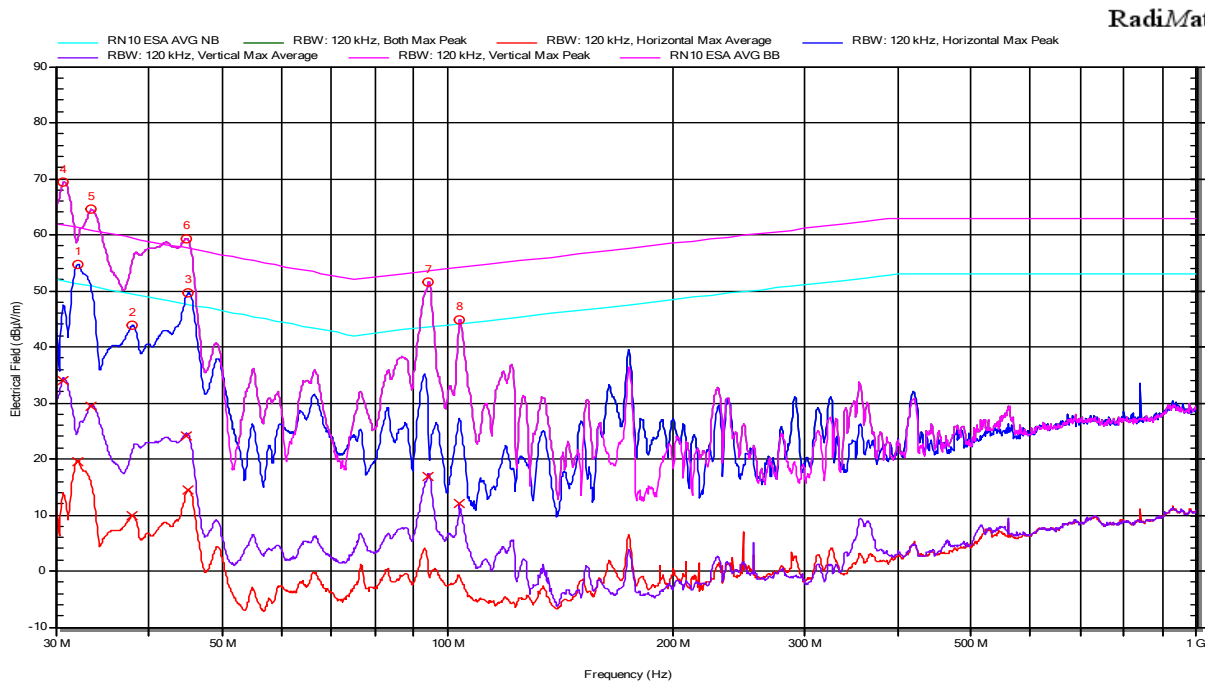


Figura. 7.2.1.2.1 Grafica sin LISN y motor con carga

-Frecuencias críticas en valor de cuasi pico.

Peak Number	Frequency	Peak	Average	Status	Polarization
1	32,1 MHz	54,8 dBμV/m	18,8 dBμV/m	Pass	Horizontal
2	38,01 MHz	43,8 dBμV/m	9,90 dBμV/m	Pass	Horizontal
3	45,12 MHz	49,6 dBμV/m	12,4 dBμV/m	Pass	Horizontal
4	30,75 MHz	69,5 dBμV/m	34,8 dBμV/m	Pass	Vertical
5	33,51 MHz	64,5 dBμV/m	29,7 dBμV/m	Pass	Vertical
6	44,79 MHz	59,3 dBμV/m	23,7 dBμV/m	Pass	Vertical
7	94,35 MHz	51,5 dBμV/m	16,4 dBμV/m	Pass	Vertical
8	103,89 MHz	44,9 dBμV/m	12,1 dBμV/m	Pass	Vertical

Figura. 7.2.1.2.2 Tabla cuasipico sin LISN y motor con carga

La emisión ha bajado en comparación a la anterior medida y vemos como pasa en todos los puntos medidos.

7.2.1.3 sin LISN, alimentación fuera y stand by.

-Medidas en valor de pico.

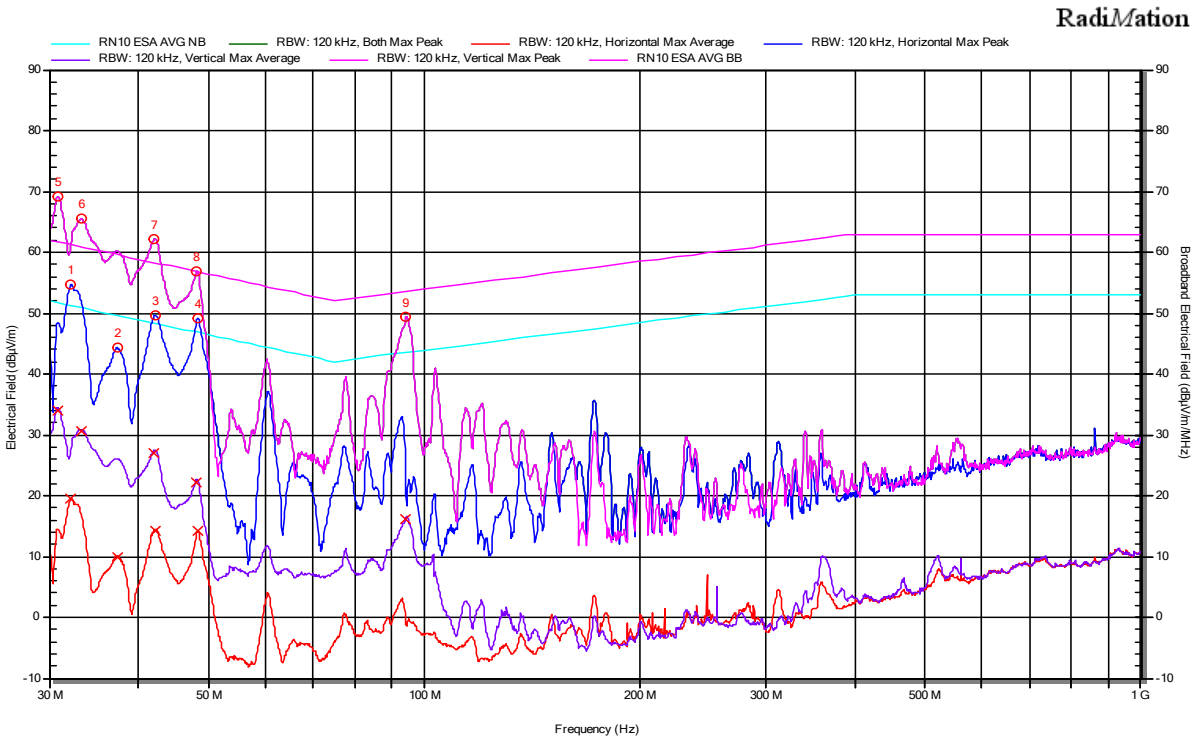


Figura. 7.2.1.3.1 Gráfica sin LISN y stand by.

-Frecuencias críticas en valor de cuasi pico.

Peak Number	Frequency	Peak	Average	Status	Polarization
1	32,19 MHz	54,7 dBμV/m	29,8 dBμV/m	Pass	Horizontal
2	37,29 MHz	44,3 dBμV/m	10,0 dBμV/m	Pass	Horizontal
3	42,15 MHz	49,6 dBμV/m	14,2 dBμV/m	Pass	Horizontal
4	48,3 MHz	49,2 dBμV/m	14,1 dBμV/m	Pass	Horizontal
5	30,81 MHz	69,1 dBμV/m	34,2 dBμV/m	Pass	Vertical
6	33,21 MHz	65,5 dBμV/m	31,1 dBμV/m	Pass	Vertical
7	42,06 MHz	62,2 dBμV/m	26,3 dBμV/m	Pass	Vertical
8	48,18 MHz	56,8 dBμV/m	22,2 dBμV/m	Pass	Vertical
9	94,41 MHz	49,4 dBμV/m	14,5 dBμV/m	Pass	Vertical

Figura. 7.2.1.3.2. Tabla cuasi pico sin LISN y stand by.

Medida muy similar a la anterior, se puede observar como la tarjeta se comporta de forma similar en stand by y con el motor con carga.



## 7.2.2 Ensayo con LISN



Figura. 7.3.2 Set up ensayo con LISN

En esta parte se conectan las LISN construidas entre la fuente y la tarjeta y en la posición de la mesa que especifica la norma, a una distancia de los bordes específica.

### 7.2.2.1 Con LISN, alimentación fuera y motor libre

-Medidas en valor de pico.

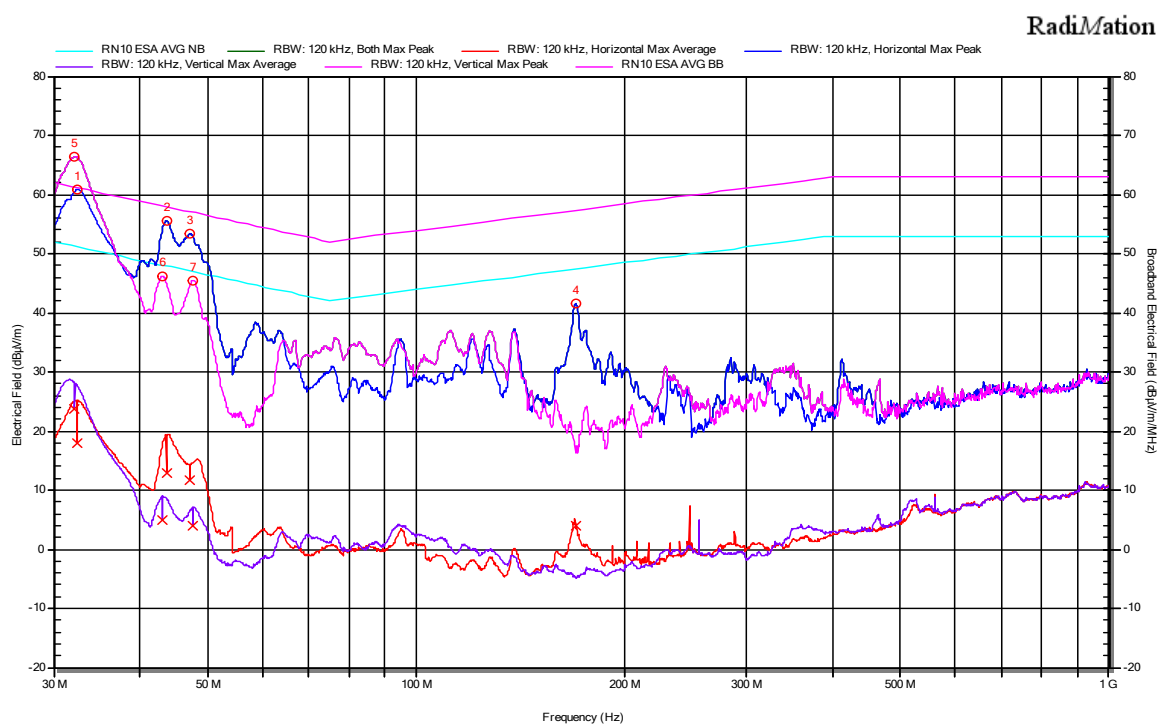


Figura. 7.2.2.1.1 Gráfica con LISN y motor libre.

-Frecuencias críticas en valor de cuasi pico.

Peak Number	Frequency	Peak	Average	Status	Polarization
1	32,43 MHz	60,8 dBµV/m	18,2 dBµV/m	Pass	Horizontal
2	43,62 MHz	55,5 dBµV/m	13,1 dBµV/m	Pass	Horizontal
3	47,16 MHz	53,3 dBµV/m	19,9 dBµV/m	Pass	Horizontal
4	170,01 MHz	41,5 dBµV/m	4,2 dBµV/m	Pass	Horizontal
5	32,19 MHz	66,4 dBµV/m	24,1 dBµV/m	Pass	Vertical
6	43,05 MHz	46,2 dBµV/m	4,4 dBµV/m	Pass	Vertical
7	47,64 MHz	45,5 dBµV/m	4,1 dBµV/m	Pass	Vertical

Figura. 7.2.2.1.2 Tabla cuasi pico con LISN y motor libre.

La señal baja notablemente respecto a todos los ensayos hechos con sin las LISN, se puede deducir que es por el correcto acoplo de las impedancias.

### 7.2.2.2 Con LISN, alimentación fuera y motor con carga

-Medidas en valor de pico.

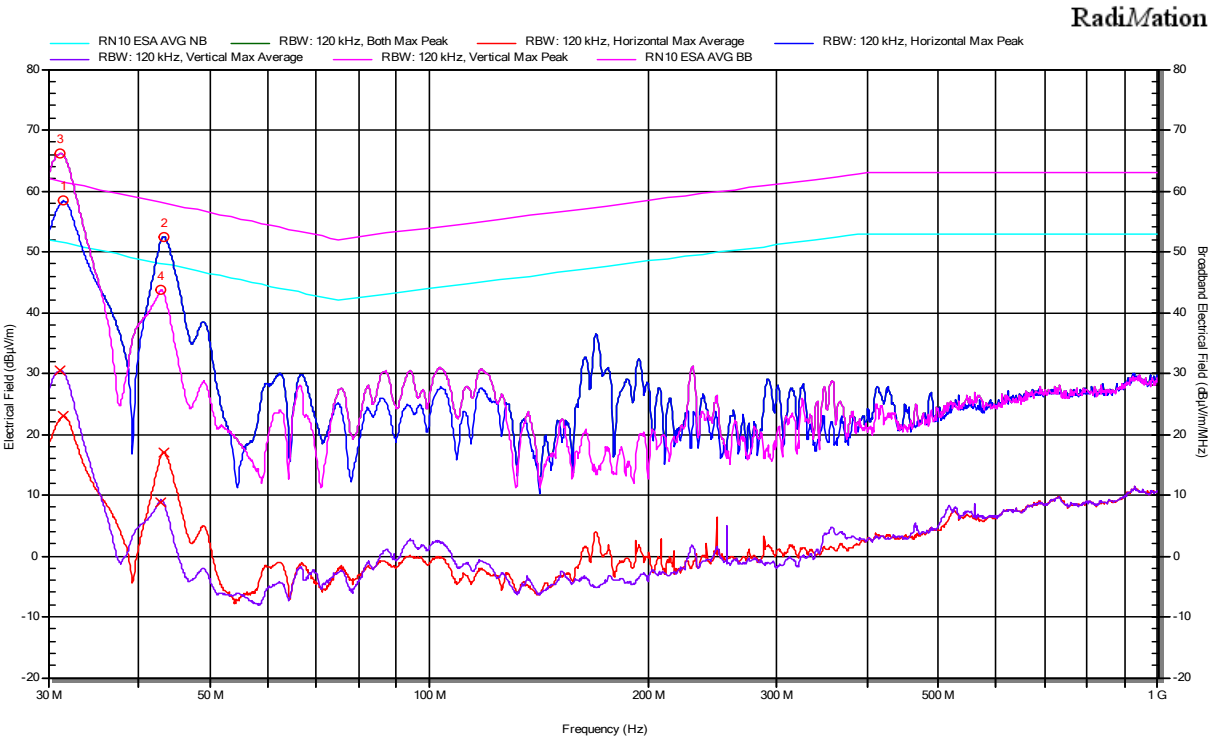


Figura. 7.2.2.2.1 Gráfica con LISN y motor con carga.



-Frecuencias críticas en valor de cuasi pico.

Peak Number	Frequency	Peak	Average	Status	Polarization
1	31,53 MHz	58,3 dBμV/m	22,1 dBμV/m	Pass	Horizontal
2	43,2 MHz	52,5 dBμV/m	28,2 dBμV/m	Pass	Horizontal
3	31,2 MHz	66,1 dBμV/m	30,4 dBμV/m	Pass	Vertical
4	42,9 MHz	43,7 dBμV/m	9,4 dBμV/m	Pass	Vertical

Figura. 7.2.2.2.2. Tabla cuasi pico con LISN y motor con carga

Al contrario que con las medidas hechas sin LISN se puede ver cómo la emisión cuando el motor está con carga baja respecto a sin carga.

7.2.2.3 Con LISN, alimentación fuera y stand by

-Medidas en valor de pico.

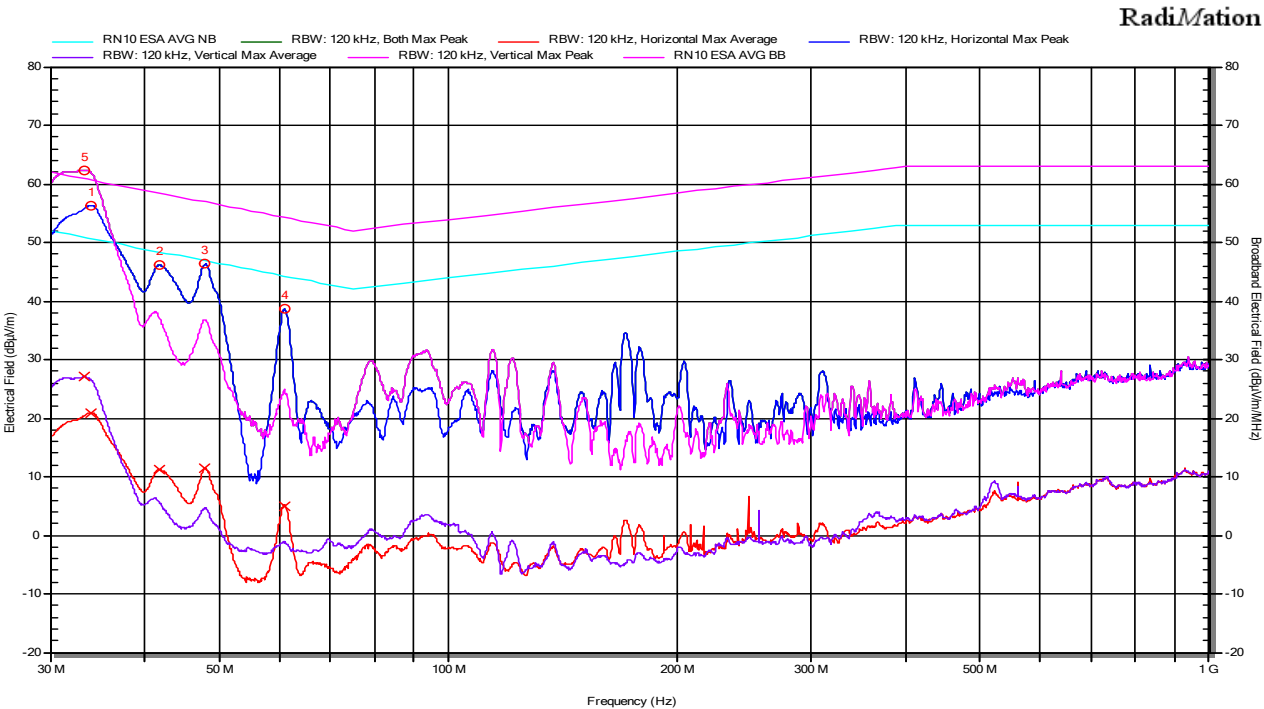


Figura. 7.2.2.3.1 Gráfica con LISN y stand by.

-Frecuencias críticas en valor de cuasi pico.

Peak Number	Frequency	Peak	Average	Status	Polarization
1	33,93 MHz	56,3 dBμV/m	20,3 dBμV/m	Pass	Horizontal
2	41,67 MHz	46,1 dBμV/m	11,3 dBμV/m	Pass	Horizontal
3	47,94 MHz	46,3 dBμV/m	11,9 dBμV/m	Pass	Horizontal
4	60,9 MHz	38,6 dBμV/m	14,5 dBμV/m	Pass	Horizontal
5	33,27 MHz	62,4 dBμV/m	26,3 dBμV/m	Pass	Vertical

Figura. 7.2.2.3.1 Tabla cuasi pico con LINS y stand by.

En este caso ocurre lo mismo que antes, la señal que emite la tarjeta en los últimos dos ensayos es muy similar.

Se puede deducir de estas pruebas la importancia de la correcta adaptación de impedancias. Se ha podido ver como no sólo cambia la amplitud de las medidas cuando se incluye las LISN, sino también su comportamiento.

La variación de la amplitud es crítica para pasar el ensayo y es importante que las redes de adaptación de impedancias cumplan con la norma para poder certificar un ensayo.

Pero el hecho de que cambie su comportamiento es importante también, aunque no queramos tener un ensayo certificado y solo queramos ver cómo se comporta en diferentes situaciones o hacer ensayos de precertificación ya que sin una correcta adaptación de impedancias el ensayo puede alejarse mucho de la realidad.

## 8 CAMPO CERCANO

### 8.1 INTRODUCCIÓN Y EXPLICACIÓN DE APARATOS DE MEDIDA

El campo cercano es la región del espacio donde la onda electromagnética posee un campo conservativo y donde la onda es predominantemente de campo magnético (H) o de campo eléctrico (E) pero no de ambos a la vez. Si el generador de ruido se caracteriza por presentar una fuente corriente eléctrica pero un bajo nivel de tensión, el campo cercano es predominantemente magnético. En este caso, se utilizan sondas de campo magnético para su caracterización.

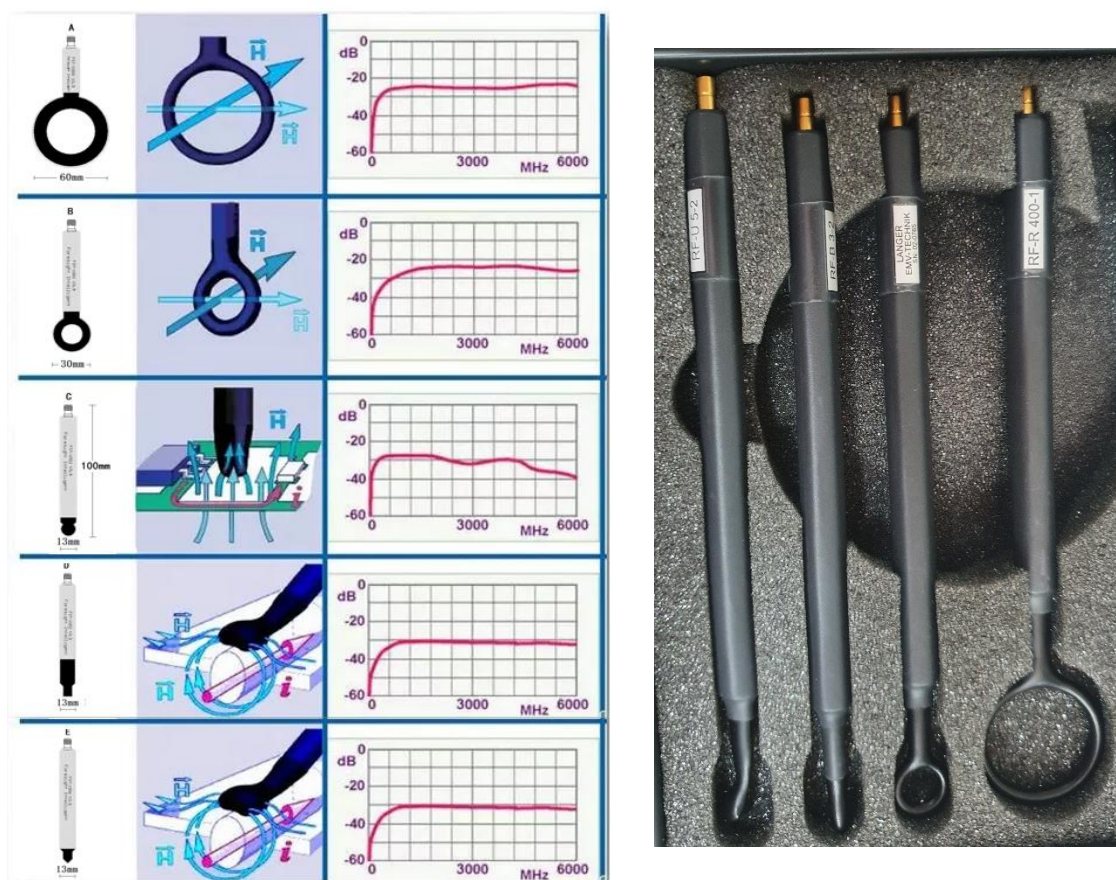


Figura. 8.1.1 Especificaciones e imagen de sondas. (fuente: Langer EMV RF2)

En el caso en el que no se haya pasado el ensayo según la norma CISPR 25, la ejecución de medidas de campo cercano puede aportar información acerca de las zonas de mayor emisión de la tarjeta. El fin de esto es localizar los focos de emisión de campo electromagnético y poder atacar el diseño de la tarjeta en aquellas zonas.

Para el siguiente ensayo se va a hacer un mapeo de la tarjeta con el fin de tratar de ver cuál es la señal que emite la misma en campo cercano en todo el rango de frecuencias y tratar de representarlo. Para ello se hace una cuadrícula, dividiendo el ancho en 12 partes y el alto en 8, haciendo un total de 96 puntos.

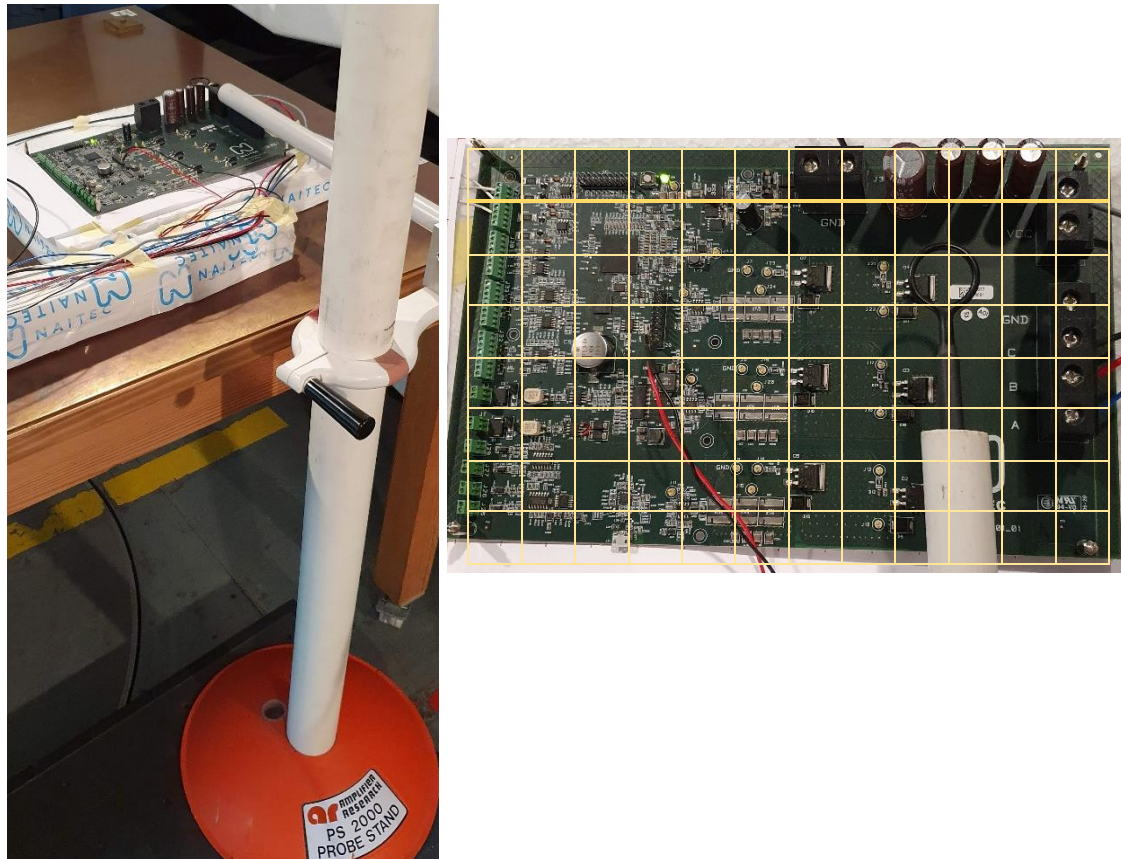


Figura. 8.1.2 Set up Medida de campo cercano y cuadrícula de mapeo

## 8.2 DATOS Y GRÁFICA 3D

Se han extraído los datos obtenidos de los 96 puntos, medidos con el software **Radima-tion** y extraídos en archivos CSV. En cada punto se obtenían más de 33330 datos lo que hacía un total de casi 3 200 000 datos.

Una cantidad de datos imposible de tratar con Excel, por lo que es necesario una herramienta mucho mas potente. Se decidió optar por **Matlab**.

Pero nos enfrentamos a un problema y es el de tener 4 dimensiones. Las dos primeras quedan marcadas por la posición de la sonda (es decir, eje X e Y), otro es la amplitud de la medida en cada momento. Por último, no podemos olvidarnos de que es un barrido frecuencial y que para cada posición de la sonda se obtienen datos hasta 1GHz.

Este problema se ha solventado haciendo una animación, es decir, se ha representado para cada valor de frecuencia una gráfica de superficie. Para poder representarlo en esta memoria se van a poner las representaciones a distintas frecuencias.

La gráfica del centro es la representación de los datos de un punto del mapeo elegido al azar, concretamente el punto 7 (eje X) y 7 (eje Y). Esta grafica se utiliza para señalar las frecuencias a las que se va a incluir la gráfica en 3D.

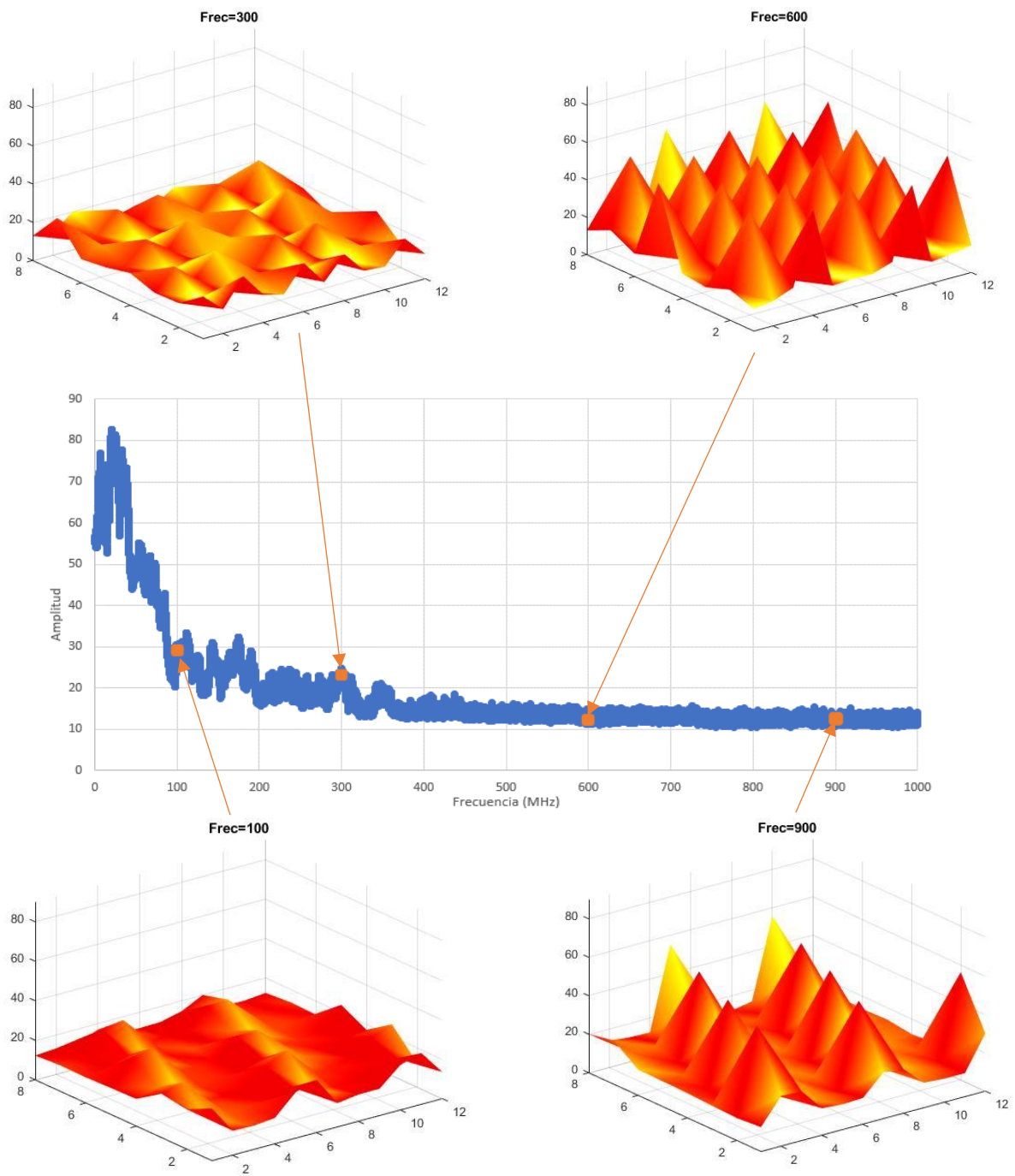


Figura. 8.2. Representación en varias frecuencias de la gráfica en 3D.



## 9 SIMULACIÓN EN CST

### 9.1 INTRODUCCIÓN A CST

**CST Studio Suite** es un software de análisis de elementos finitos de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos (EM). Una herramienta tan potente como compleja y la cual requiere de unos requisitos hardware bastante altos.

Para poder utilizar este software es necesario tener una licencia, en este caso se utilizará la licencia de estudiante. Esta licencia limita varias funciones avanzadas y también el número de celdas del mayado a la hora de la simulación.

Se ha invertido un tiempo en tratar de familiarizarse con el programa, intentando simular elementos sencillos y viendo qué es lo que ofrece este programa.

### 9.2 SIMULACIÓN DE ELEMENTOS SENCILLOS

Para poder simular en este programa es necesario crear un modelo en 3D, en este caso se ha optado por crear dos cables exactamente iguales, cable que se compone de un conductor eléctrico en su interior y un dieléctrico que lo rodea.

Se puede simular en dominio de la frecuencia o del tiempo según interese dependiendo del proyecto. Las siguientes imágenes se corresponden a capturas de pantalla de la simulación, con diferentes cortes.

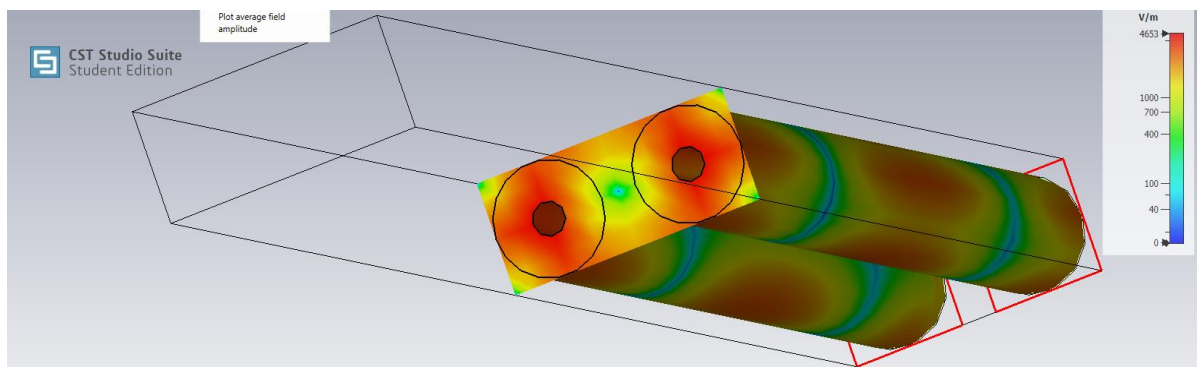


Figura. 9.2.1. Imagen CST 1.

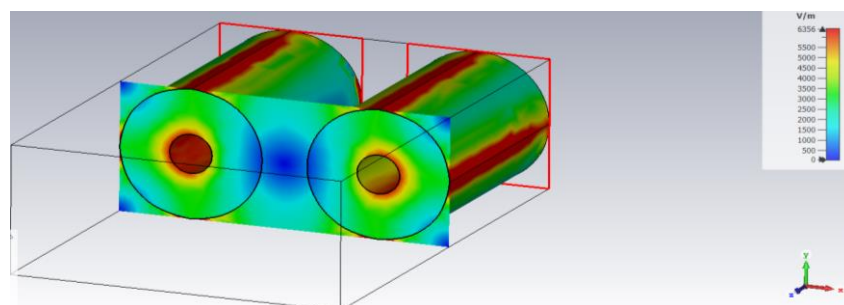


Figura. 9.2.2. Imagen CST 2.

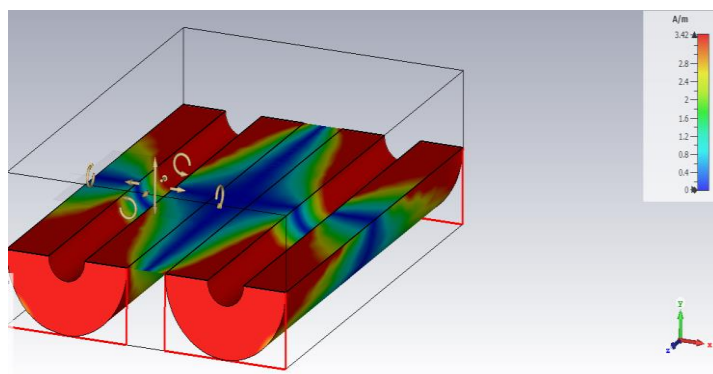


Figura. 9.2.3. Imagen CST 3.

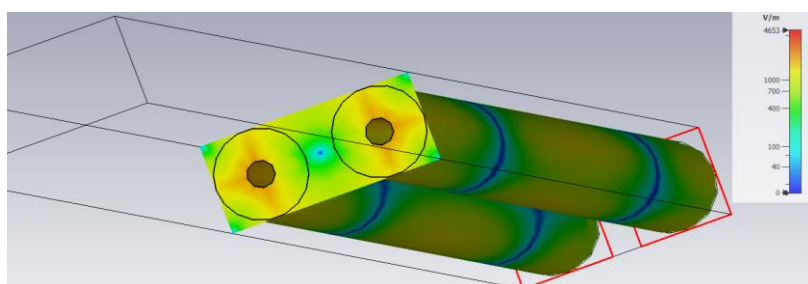


Figura. 9.2.4. Imagen CST 4.

A parte de los cables se intentó simular una bobina con las mismas características que las creadas.

En primer lugar se hace el diseño en 3D, se ha buscado que sea lo más parecido a la realidad de ahí que se haya incluido también la parte de PVC. El resultado es el siguiente:

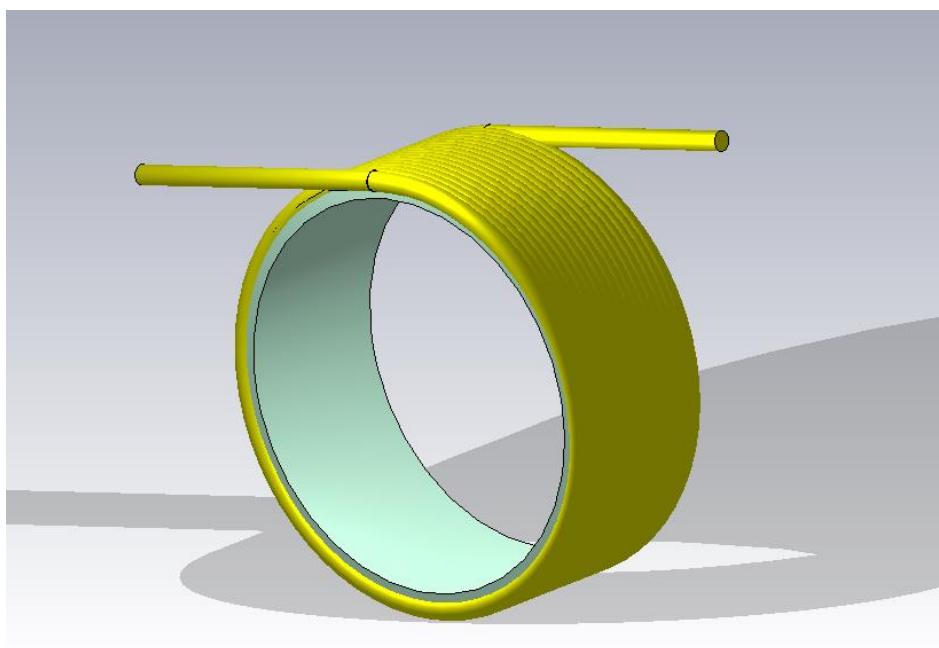


Figura. 9.2.5. Imagen del modelo 3D de la bobina en CST.

Se ha conseguido simular la bobina, acoplando un campo magnético pulsante que atraviesa perpendicular a la bobina.

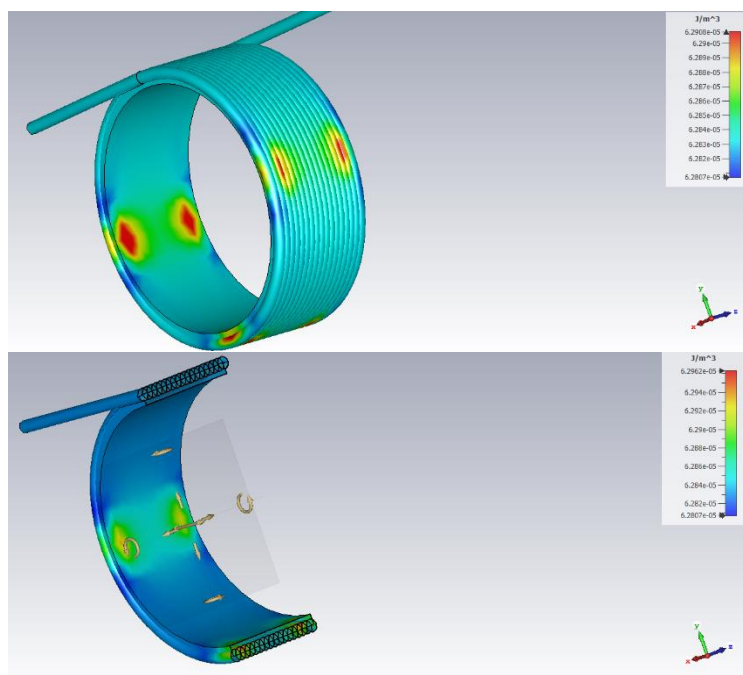


Figura. 9.2.6. Capturas de la simulación en CST.

A pesar de que se puede ver cómo se genera energía en la bobina no es el comportamiento esperado, debe haber algún fallo en el modelo o en la configuración de los parámetros de la simulación que hacen que el resultado no sea el deseado. Por motivos de limitación temporal no ha sido posible continuar con este estudio.

### 9.3 SIMULACIÓN DE PROYECTO

Esta parte no se ha podido llevar a cabo debido a la limitación temporal del trabajo. También cabe destacar que el programa utilizado es un software profesional muy complejo que necesita tanto de un largo entrenamiento, como de una gran potencia computacional. Se comentará más en profundidad en el apartado “10. Conclusiones y líneas futuras.”



## 10 . CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

---

Con la realización de este proyecto se ha obtenido un aprendizaje muy valioso. Inicialmente, se ha entrado en el mundo de electromagnetismo y del EMC, viendo todos los ensayos que normalmente se efectúan sobre sistemas eléctricos y electrónicos para poder afrontar el proceso de su marcado CE. Se ha aprendido a interpretar las normas y sobre todo a saber localizar la información de interés. Gracias a esto se ha podido estudiar la realización de los ensayos de la norma CISPR 25 en el centro tecnológico **Fundación I+D automoción y mecatrónica** (NAI-TEC).

También algo muy importante es que se ha aprendido a resolver los problemas que se encuentran a lo largo de un proyecto, como el hecho de diseñar y construir un par de LISN óptimas para ensayos EMC en el ámbito de automoción, que si bien no cumplen con los requisitos para poder ser empleadas en ensayos acreditados han servido para poder seguir con el proyecto. Se puede incluir a esta parte el aprendizaje obtenido referente a la utilización, tanto de herramientas mecánicas (torno, plegadora, soldador...), como eléctricas (RLC, VNA, detector de EMI...), como de softwares de simulación (RF99, CST...).

Por último, en los ensayos tanto de emisión radiada, como de campo cercano, se ha podido ver de forma más gráfica cual es el comportamiento de los sistemas electrónicos bajo ensayo en diferentes situaciones. Algo que ha sorprendido es cómo cada componente de un ensayo, su disposición e incluso el ambiente en el que se realiza tiene un papel fundamental en la medida y en su repetibilidad.

El proyecto inicial quería abordar más campo referente a la simulación, algo que es claramente ambicioso y que existía la posibilidad de no llegar a realizar, sobre todo por limitación temporal. Es lo que finalmente ha ocurrido y es exactamente la vía más interesante con la que se puede continuar este proyecto. Como se ha comentado durante el proyecto en repetidas situaciones, existen diversos softwares de simulación muy potentes, en especial CST en el que se podría llegar a introducir el CAD de la tarjeta que se ha ensayado y simular con la misma distribución que en la cámara anecoica, todo esto de forma relativamente sencilla. Esto conlleva una ventaja fundamental y es que la obtención de este programa de simulación, aun siendo una inversión elevada, no se acerca a la que implica tener todo lo necesario para efectuar los ensayos de forma convencional (cámara, receptores de EMI, antenas...) por lo que se podría obtener simulaciones de ensayos de componentes antes de tenerlos fabricados, pudiendo ver si existen emisiones por encima de la norma y poder corregirlos en el proceso de diseño.

## 11 BIBLIOGRAFÍA.

---

- [1] D.Morgan, *A Handbook for EMC Testing and Measurement*. London, United Kingdom, 2007.
- [2] M. Gavião, M.B. Perotoni, “Electromagnetic *Simulation Applied to Automotive EMC Testing*”, In *Compilance*, 30, Sept. 2014.
- [3] *Límites y métodos de medida de perturbaciones radioeléctricas para la protección de los receptores utilizados a bordo de vehículos*. Norma CISPR 25:2016.
- [4] *Métodos de ensayo*. Fundación I+D Automoción y Mecatrónica.
- [5] V.Mata García, “Diseño e implementación de un sistema completo de medida de antenas en campo abierto.”, trabajo de fin de grado, Univ. Pol. Casteldefells, 2006.
- [6] *Proyecto Sofia*. Fundación I+D Automoción y Mecatrónica.
- [7] Agilent Technologies, *4263B LCR Meter Operation Manual*. Hyogo, Japón, 1996.
- [8] HP, *Operating the 4195A-Operating Manual*, 1 de Enero, 1990.
- [9] CST Studio Suite ® [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/>.
- [10] Biblioteca de la Universidad Pública de Navarra. Oficina de Referencia. “*Guía para citar y referenciar. IEEE Style*”, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/LaUj46>.